

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## **Hodnocení geometrie součástí hřídelového typu**

## **Geometry Evaluation of Shaft Type Workpieces**

Student:

Bc. Vít Tomášek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vít Tomášek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení geometrie součástí hřídelového typu**  
**Geometry Evaluation of Shaft Type Workpieces**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Přehled geometrického tolerování.
3. Analýza metod měření.
4. Měřicí technika pro hodnocení geometrií.
5. Experimentální část.
6. Zhodnocení výsledků.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

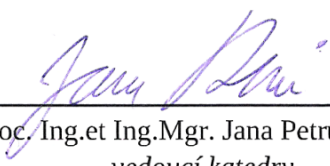
- [1] ČEPOVÁ, L.; Petřkovská, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže FS VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4.  
[2] PETŘKOVSKÁ, L. ; ČEPOVÁ, L. *Metrologie a řízení kvality*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012. 142 s. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné na <http://projekty.fs.vsb.cz/459/?ucebni-opory>.  
[3] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie, část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 104 s. ISBN 80-248-0671-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřová, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

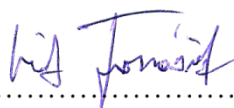
V Ostravě ..... 2.5.2017

.....  
Vít Tomášek  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školního představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst.3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

2.5.2017  
V Ostravě: .....

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Vít Tomášek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Energetiků 942

73514 Orlová - Lutyně

### ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomášek, V. *Hodnocení geometrie součástí hřídelového typu: diplomová práce.* Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie 2017, 80 s. Vedoucí práce: Ing. Čepová, L. Ph.D.











Zpracovaná diplomová práce se zabývá analýzou metod měření hřídelových součástí s důrazem na problematiku měření geometrií. Teoretická část popisuje metody měření geometrií, jejich definice podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 1101 a možnosti vyhodnocení. V experimentální části byla proměřena železniční náprava. Měření bylo uskutečněno na souřadnicovém měřicím stroji Wenzel LH 1512 se senzorikou TP200, automatické měřicí stanici Amest KS 578 a na souřadnicovém měřicím stroji Wenzel LH 1512 se senzorikou SP80 ve firmě Bonatrans Group a.s. Cílem této práce je analýza možných způsobů měření jednotlivých geometrií železničních náprav na dostupných měřicích zařízeních.

### ANOTATION OF MASTER THESIS

Bc. Tomášek, V. *Geometry Evaluation of Shaft Type Workpieces: Master Thesis.* Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering. Department of Machining, Assembly and engineering metrology 2017, 80 p. Thesis head: Ing. Čepová, L. Ph.D.

Master thesis is dealing with the analysis of railway axle accuracy measuring methods, with particular focus on geometry measurement. The theoretical part describes geometry measuring methods and their definition according to the ČSN EN ISO 1101 international standard. In the practical part, a railway axle was measured. The measurement was on the coordinate measuring machine Wenzel LH 1512 and measuring station Amest KS 578 in Bonatrans Group company. The aim of the thesis was analysis of current situation and assessment of possible ways of geometry measurement of railway axles.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>6</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....</b>	<b>8</b>
<b>1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....</b>	<b>11</b>
1.1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI .....	12
1.2 VÝROBNÍ PROGRAM.....	13
1.2.1 Dvojkolí.....	13
1.2.2 Kola .....	14
1.2.3 Tlumiče hluku.....	14
1.2.4 Náprava.....	15
1.2.5 Popis nápravy .....	15
<b>2 PŘEHLED GEOMETRICKÉHO TOLEROVÁNÍ.....</b>	<b>17</b>
2.1 PŘEHLED GEOMETRICKÝCH TOLERANCÍ.....	18
2.2 PŘÍMOST —.....	19
2.3 KRUHOVITOST  .....	20
2.4 VÁLCOVITOST  .....	21
2.5 ROVNOBĚŽNOST // .....	22
2.6 KOLMOST  .....	23
2.7 SOUSTŘEDNOST, SOUOSOST  .....	24
2.8 TOLERANCE HÁZENÍ  ,  .....	24
2.8.1 Obvodové, celkové obvodové házení  ,  .....	24
2.8.2 Čelní, celkové čelní házení  ,  .....	25
2.9 ZÁVISLÉ TOLERANCE .....	26
2.10 ZÁKLADNY.....	27
<b>3 ANALÝZA METOD MĚŘENÍ .....</b>	<b>29</b>
3.1 SPOJITÁ METODA .....	29
3.2 NESPOJITÁ (DISKRÉTNÍ) METODA.....	29
3.3 CHYBY MĚŘENÍ.....	30
3.3.1 Systematické chyby .....	30
3.3.2 Náhodné chyby .....	30
3.3.3 Hrubé chyby .....	32
3.4 NEJISTOTY MĚŘENÍ .....	33
3.4.1 Standardní nejistota typu A ( $u_A$ ).....	33

3.4.2	Standardní nejistota typu B ( $u_B$ ) .....	34
3.4.3	Kombinovaná nejistota $u_C$ .....	34
3.4.4	Rozšířená nejistota $U$ .....	34
3.5	MAXIMÁLNĚ PŘÍPUSTNÁ CHYBA MPE (MAXIMUM PERMISSIBLE ERROR) .....	35
3.6	METODY PŘIPASOVÁNÍ .....	37
3.7	ELIMINACE ODLEHLÝCH HODNOT A FILTRACE .....	40
<b>4</b>	<b>MĚŘICÍ TECHNIKA PRO HODNOCENÍ GEOMETRIÍ .....</b>	<b>45</b>
4.1	SOUŘADNICOVÝ MĚŘICÍ STROJ.....	47
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>51</b>
5.1.1	Měření nápravy na SMS .....	51
5.2	MĚŘENÍ NÁPRAVY NA MĚŘICÍ STANICI AMEST KS-578 .....	53
5.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	55
<b>6</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
	<b>PODĚKOVÁNÍ .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>80</b>

## Seznam použitých zkratk

Symbol	Význam	Jednotka
A	Základna	[-]
A <sub>1</sub>	Obalový prvek	[-]
A <sub>2</sub>	Obalový prvek	[-]
A <sub>3</sub>	Obalový prvek	[-]
BTG	Bonatrans Group a.s.	[-]
B	Základna	[-]
B <sub>1</sub>	Obalový prvek	[-]
B <sub>2</sub>	Obalový prvek	[-]
B <sub>3</sub>	Obalový prvek	[-]
CWL	Ořezání vlnové délky	[mm]
C <sub>1</sub>	Umístění středu kružnice	[-]
C <sub>2</sub>	Umístění středu kružnice	[-]
ČSN	Česká státní norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
GPS	Geometrická specifikace výrobků	[-]
H	Mezní hodnota	[-]
H <sub>2</sub>	Normovaná hodnota	[-]
H <sub>n</sub>	N-tá normovaná hodnota	[-]
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
IT	Stupeň přesnosti	[-]
L	Délka měřené součásti	[mm]
LSC	Kružnice nejmenších čtverců (Least Square Circle)	[-]
Max.	Maximální hodnota	[mm]
Min.	Minimální hodnota	[mm]
MCC	Minimální opsaná kružnice (Minimum Circumscribed Circle)	[-]
MIC	Maximální vepsaná kružnice (Maximal Inscribed Circle)	[-]
MZC	Nejmenší pásmo – mezikružší (Minimum Zone Circle)	[-]
MPE <sub>E</sub>	Maximální dovolená chyba měření délky	[μm]
MPE <sub>P</sub>	Maximální dovolená chyba snímání	[μm]
MPE <sub>THP</sub>	Maximální dovolená chyba při skenování	[μm]
NN	Počet průchodů nulou	[-]



NW	Počet vln	[-]
R	Poloměr hrotu doteku	[mm]
SMS	Souřadnicový měřicí stroj	[-]
SP80	Skenovací sonda	[-]
TP200	Dotyková sonda	[-]
U	Rozšířená nejistota	[mm]
W/C	Ořezání vlnového čísla	[-]
W/U	Vlny na obvod	[-]
$Z_1$	Osa obalového válce	[-]
$Z_2$	Osa obalového válce	[-]
a	Základna	[-]
$d_{\max}$	Maximální průměr	[mm]
$d_{\min}$	Minimální průměr	[mm]
e	Konstanta	[-]
$f(x)$	Funkce normálního rozdělení	[-]
$s(x)$	Výběrová směrodatná odchylka	[mm]
$s(\bar{x})$	Výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru	[mm]
$h_1$	Hodnota odchylky	[mm]
$h_2$	Hodnota odchylky	[mm]
$h_3$	Hodnota odchylky	[mm]
$k_{uA}$	Korekční koeficient	[-]
n	Počet měření	[-]
r	Poloměr hrotu doteku	[mm]
$r_1$	Poloměr válce	[mm]
$r_2$	Poloměr válce	[mm]
t	Toleranční pole	[mm]
$u_A$	Standardní nejistota typu A	[mm]
$u_{Ak}$	Korigovaná nejistota typu A	[mm]
$u_B$	Standardní nejistota typu B	[mm]
$u_{Bzi}$	Standardní nejistota typu B zdroje $z_i$	[mm]
$u_C$	Kombinovaná nejistota	[mm]
$x_i$	Jednotlivé naměřené veličiny	[mm]
$x_2$	Naměřená veličina	[mm]
$x_n$	N-tá naměřená veličina ze souboru	[mm]

$\bar{x}$	Průměr hodnot	[mm]
$z_{\max}$	Odhad odchylek	[mm]
$\varepsilon_i$	Chyba měření	[mm]
$\mu$	Střední hodnota	[mm]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\sigma$	Směrodatná odchylka	[mm]
$\chi$	Koeficient	[-]
$\Delta$	Velikost úchylky	[mm]
$\Delta r_1$	Radiální vzdálenost obalového prvku	[mm]
$\Delta r_2$	Radiální vzdálenost obalového prvku	[mm]
$\varnothing t$	Kruhové toleranční pole	[mm]
$\textcircled{E}$	Požadavek kontroly obalovou plochou	[-]

# 1 Úvod do problematiky

Výrobu jednotlivých součástí a hotových výrobků doprovází neustálý vývoj a inovace. Trendem v minulých letech bylo zvyšování přesnosti výroby IT v průběhu deseti let až o jeden stupeň. Další vývoj zřejmě nebude takto rychle postupovat, neboť velikost tolerančních polí a tvarových odchylek musí být zhotovitelná dostupnou technologií. Nabídnout kvalitní výrobek a uspět v konkurenčním prostředí, znamená využívání technicky pokročilých zařízení, které umožňují náročnou výrobu. Shodnost výrobku musí být následně ověřena nejvhodnější technologií, která poskytuje věrohodné výsledky měření s přihlédnutím na samotnou funkci měřené součásti. Tvarová a rozměrová přesnost patří mezi důležité znaky jakosti.

Tato práce je zaměřena na hodnocení geometrií součástí hřídelového typu. Navazuje a rozšiřuje bakalářskou práci „**Analýza metod měření přesnosti železničních náprav**“. Rotační součásti tvoří nejpočetnější skupinu obráběných dílců ve výrobkovém sortimentu. Lze je poměrně snadno a levně vyrobít s velmi vysokou přesností, rozměrovou i tvarovou. Pro kontrolní účely existují konvenční měřicí zařízení, která prověří jednotlivé geometrie a rozměry součásti s velmi vysokou přesností a opakovatelností. Stále častěji se tyto rotační součásti stávají komplikovanější a obsahují prvky skříňového charakteru, které již na konvenčních strojích proměřit nelze. Další komplikaci představuje rozměrové a hmotnostní omezení běžně dostupných konvenčních zařízení.

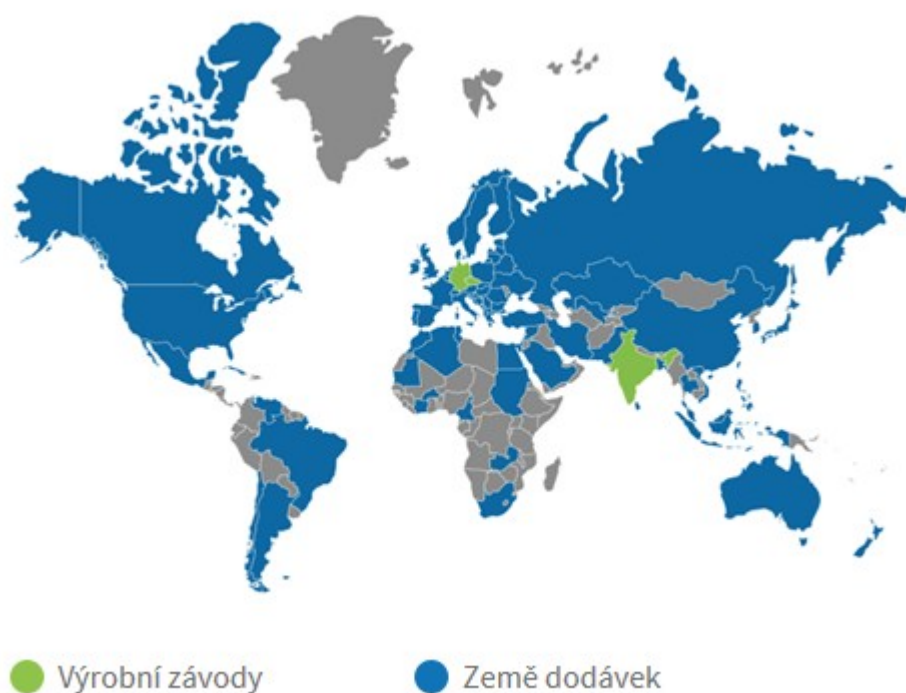
Typickým případem rotační součásti, která splňuje požadavky velmi přesné, rozměrné a mnohdy komplikovaného tvaru je železniční náprava. Nároky na provoz těchto komponentů jsou velmi vysoké, nejen zvyšující se provozní rychlostí, nápravovým zatížením, ale také bezpečnost provozu představuje specifický přístup při jejich výrobě a následné kontrole.

Standardně dodávaná konvenční měřicí zařízení pro měření geometrií nenabízí potřebný rozsah měření. Cena a využití konvenčních měřicích zařízení dodaných dle požadavků obrobku, neumožňuje důkladné prověření celé součásti. Cílem této práce je vyzkoušet a poukázat na úskalí různých metod způsobů měření geometrií a vyhodnocení železniční nápravy na souřadnicovém měřicím stroji (dále SMS), který je univerzální, ovšem s jistými omezeními. Umožňuje však komplexní proměření výrobku, v mnoha případech dostačující přesností. Konvenční stroje pro měření geometrií nabízí velmi vysokou přesnost, opakovatelnost a rychlost měření, proto jejich umístění do provozu poskytuje neocenitelné výhody při měření velkého množství kusů s rychlou reakcí na případné neshody.

## 1.1 Představení společnosti

Výrobním sortimentem společnosti BONATRANS GROUP a.s. (dále jen BTG) se sídlem v Bohumíně je komplexní nabídka dvojkolí a jejich části pro všechny druhy kolejových vozidel. Náročné požadavky zákazníků vyžadují neustálé inovace. Vlastní vývoj, výroba, montáž a servisní služba neustále hledá nejlepší řešení. BTG založena roku 1965 a s více než padesátiletou praxí v oboru patří mezi významné světové dodavatele železničních dvojkolí. V roce 2014 proběhla akvizice společnosti Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH založenou v roce 1782 se sídlem v německém Oberhausenu. Během více než 200 leté praxe přispělo průkopnickými zásadními technickými objevy k posunu celého odvětví vpřed.

Založení společností Bonatrans India Pvt.Ltd. v roce 2013 a Bonatrans Asia Ltd. v roce 2016 umožní rozšiřovat další obchodní úspěchy a postavení na trhu. Dodávky výrobků probíhají do více než 80 zemí světa (Obr. 1) [1].



Obr. 1 Výrobní závody a země dodávek [1]

## 1.2 Výrobní program

Sortiment nabízených výrobků představuje dodávky železničních dvojkolí a jejich částí pro vysokorychlostní vlaky, klasické osobní a nákladní vlaky, tramvaje, metro a lokomotivy. Nejen výrobky dle výkresů zákazníků, ale také vlastní konstrukce různých typů kol a náprav, doprovází jejich neustálé vylepšování.

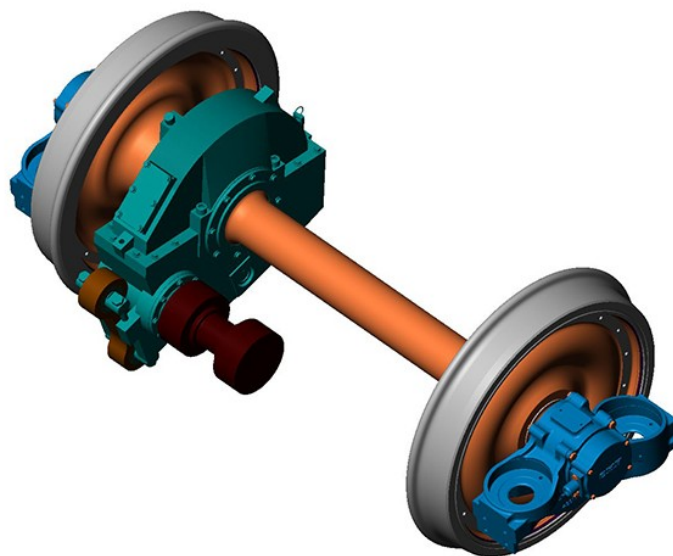
Stěžejní produkty výrobního programu:

- dvojkolí,
- kola,
- tlumiče hluku,
- nápravy,
- náhradní díly.

### 1.2.1 Dvojkolí

Dvojkolí nesou a vedou celou hmotnost kolejového vozidla (Obr. 2). Náprava s dvojicí kol je většinou spojena nalisováním, přesně specifikovaným lisovacím tlakem a průběhem. Síla, kterou je kolo lisováno na nápravu, je v průběhu lisování zaznamenávána. Vytvořený záznam slouží ke kontrole pevnosti lisovaného spoje. Dvojkolí mohou být součástí pohonu a brzdového systému.

Dalším, méně častým způsobem vytvoření dvojkolí představuje montáž tepelným smrštěním. Ohřevem na požadovanou teplotu v elektrické peci se kola roztáhnou a pomocí přípravků umístí do požadované polohy na nápravě. Po zchladnutí dochází smrštěním k vytvoření pevného spoje. [2]



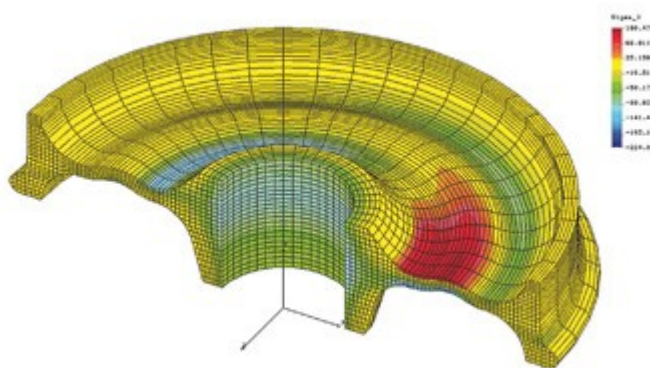
Obr. 2 Dvojkolí pro vozy metra [1]

### 1.2.2 Kola

Železniční doprava představuje účinný způsob přepravy. K pohybu jednotky dochází odvalováním kola po kolejích za vzniku valivého tření. Při styku dvou kovů dosahuje valivé tření velice nízkých hodnot. Vysoké tlaky v bodě kontaktu kola s kolejnicí a následné opotřebení vyžaduje při výrobě kol použití kvalitních ocelí s následnou tepelnou úpravou.

Kola jsou vyráběna jako [1]:

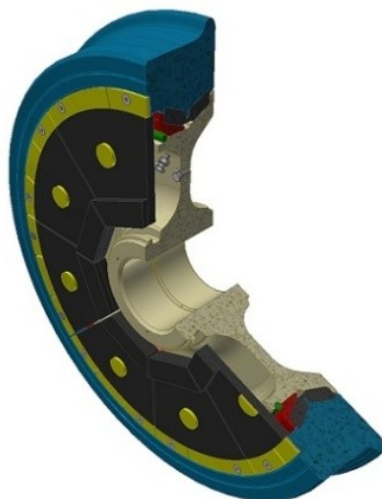
- celistvá (Obr. 3),
- obručová,
- kola se systémy tlumení hluku,
- pryží odpružená a vysoce odpružená kola,
- kola zpevněná kuličkováním,
- napěťově a tepelně optimalizovaná kola,
- speciální kola.



Obr. 3 Pevnostní výpočet celistvého kola [1]

### 1.2.3 Tlumiče hluku

Městská a příměstská doprava kolejových vozidel zastává velmi důležitou úlohu přepravy cestujících. Ekologické a kapacitní přínosy železniční dopravy obyvatel denně usnadňují cestování. Problémem v oblasti představuje hluk. Snižování hluku je věnováno velké pozornosti. Vlastní výrobky, prostřednictvím tlumičů hluku, dosahují snížení valivého hluku až o 5 dB (A) a až o 30 dB (A) kvilivého zvuku (Obr. 4) [1].



Obr. 4 Listové tlumiče [1]

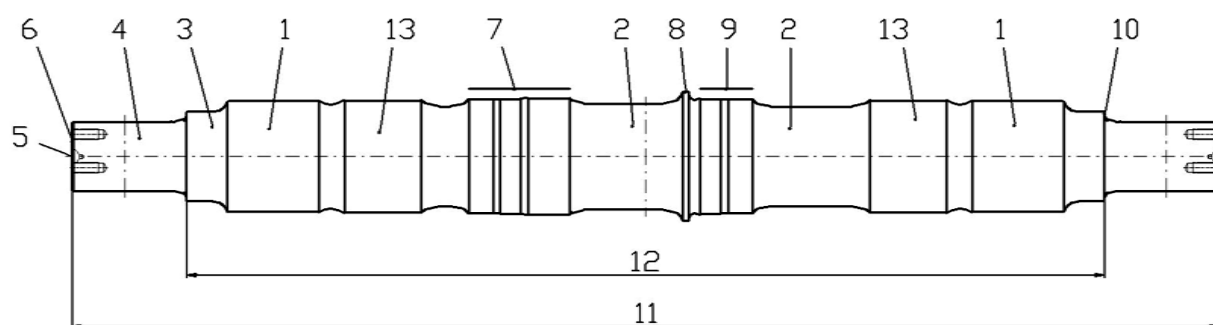
### 1.2.4 Náprava

Náprava je nosník válcového tvaru. Slouží k upevnění kol a udržení jejich předepsaného rozchodu. Montáž nápravových ložisek, kol, případně kotoučových brzd nebo převodovky pohonu vyžaduje vysokou rozměrovou i geometrickou přesnost v opracování. Náprava je navrhována jako součást podvozku s předpokládanou životností celého vozidla. Systém řízení kvality zabezpečuje splnění těchto vysokých nároků. Montáž kol a případných komponentů probíhá v převážné většině na nápravu nalisováním. Přesně stanoveným přesahem za vzniku pružné deformace vznikne svěrný spoj. Rovnoměrně rozdělený plošný tlak vyvolá třecí odpor, který přenáší provozní točivý odpor.

Průběh výroby nápravy z vakuové oceli začíná kováním předvalku čtvercového nebo válcového průřezu. Řízená tepelná úprava (normalizace nebo kalení) umožní dosažení požadovaných materiálových vlastností. Po ověření materiálové kvality následuje obrábění nápravy vrtáním, soustružením a broušením nakulato. Nedestruktivní ultrazvuková, magnetoskopická a rozměrová kontrola slouží k prokázání shody a vyhovující kusy následují k dokončovacím operacím: nátěru, konzervaci a balení.

### 1.2.5 Popis nápravy

Hnací a nehnací nápravy (Obr. 5) mohou být opatřeny brzdovými kotouči, dalšími sedly, pohonem, nebo jejich kombinací. Částečný nebo podélný vývrt umožňuje snadnou diagnostiku únavových trhlin. Indukčně kalená náprava **BONAXLE®**, ochrana povlakem molybdenu, válečkování nebo speciální nátěry nabízí vyšší životnost, spolehlivost a bezpečnost provozu [1].



**Obr. 5** Popis jednotlivých částí nápravy

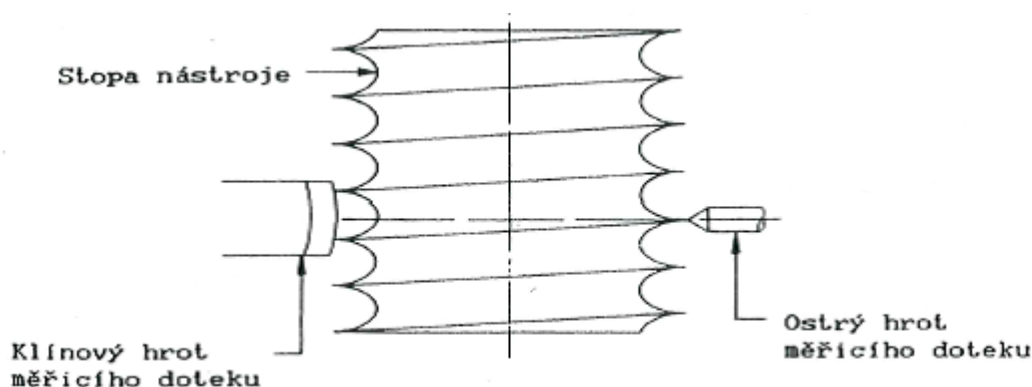
1. sedlo kola.
2. dřík.
3. prašník (sedlo opěrného kroužku).
4. čep ložiska.
5. středící důlek.
6. čelo nápravy.
7. sedlo převodovky.
8. osazení.
9. čep tlakového ložiska.
10. základní hrana.
11. délka nápravy.
12. vzdálenost základních hran.
13. sedlo brzdového kotouče.



## 2 Přehled geometrického tolerování

Skutečný tvar a jakost obrobeného povrchu závisí na zvolené technologii výroby. Podle složek roztečí nerovností skutečný povrch obsahuje parametry: **R** – **drsnost povrchu** s nejmenší roztečí, **W** – **vlitost** a **P** – **základní profil** s největší roztečí. Tyto opakující se povrchové nerovnosti doplňují dále náhodné nerovnosti jako důlky a trhliny. V závislosti na funkci výrobku mohou být některé složky povrchu bezvýznamné nebo naopak v případě valivých ložisek posuzovaných parametrů stále přibývá.

Geometrické tolerance mohou, ale většinou neobsahují při hodnocení krátkovlnné složky drsnosti. Měření je možno provádět různými metodami na různých strojích. Každá metoda má své přednosti a nedostatky. Volbou vhodného průměru hrotu doteku probíhá v průběhu měření mechanická filtrace krátkovlnných složek. Tato vlastnost umožňuje vhodnou volbou průměru doteku (Obr. 6) ovlivnit výsledek měření. Norma ČSN ISO 4291 *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti. Měření změn poloměru* připouští hodnoty poloměrů hrotů doteků  $R = r: 0,25; 0,8; 2,5; 8$  a 25 mm. [3]



Obr. 6 Vliv poloměru hrotu měřicího doteku při kontaktu s povrchem [3]

## 2.1 Přehled geometrických tolerancí

Norma ČSN EN ISO 1101 *Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení* (Tab. 1) obsahuje definice základních pojmů a pravidel předepisování geometrických tolerancí ve výrobní dokumentaci [4]. Vyjádření požadavků funkčních ploch upravuje jednoznačným výkladem. Požadavky mohou být vztaženy k jednomu prvku. Tato skupina tolerancí zahrnuje odchylky **tvaru**. Předepisované geometrické tolerance vztaženy ke dvěma a více prvkům představují odchylky: **orientace**, **umístění** a **házení**.

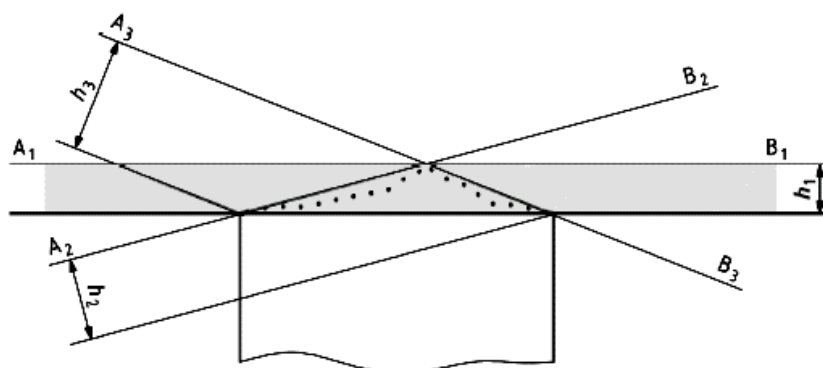
Tab. 1 Geometrické tolerance [4]

Tolerance	Charakteristiky	Značka
Tvar	Přímost	—
	Rovinnost	
	Kruhovitost	
	Válcovitost	
	Tvar čáry	
	Tvar plochy	
Orientace	Rovnoběžnost	
	Kolmost	
	Sklon	
	Tvar čáry	
	Tvar plochy	
Umístění	Poloha	
	Souosost	
	Soustřednost	
	Souměrnost	
	Tvar čáry	
	Tvar plochy	
Házení	Kruhové	
	Celkové	

## 2.2 Přímost —

Přímost jednotlivého tolerovaného prvku je posuzována jako správná, jestliže prvek leží mezi dvěma přímkami a vzdálenost mezi nimi je nejvýše rovna hodnotě předepsané tolerance. [4]

Cílem vyhodnocení velikosti odchylky přímosti je určení orientace obalových přímek s nejnižší hodnotou odchylky  $h_1$ . Z několika směrů obalových přímek, pouze směr  $A_1 - B_1$  odpovídá požadavku (Obr. 7).



Obr. 7 Orientace přímek přímosti [4]

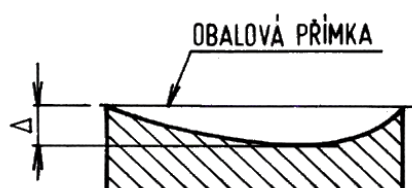
Tvar profilu přímosti dle funkčního požadavku může, nesmí nebo musí být konvexní, nebo konkávní.

**Vypuklý (konvexní) profil** – úchylka přímosti kdy vzdálenosti bodů skutečného profilu od obalové přímky se od okrajů směrem ke středu zmenšují (Obr. 8).



Obr. 8 Konvexní profil [5]

**Vydutý (konkávní) profil** – úchylka přímosti kdy vzdálenosti bodů skutečného profilu od obalové přímky se od okrajů směrem ke středu zvětšují (Obr. 9).

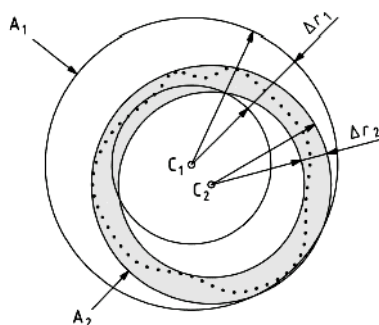


Obr. 9 Konkávní profil [5]

## 2.3 Kruhovitost ○

Kruhovitost jednotlivého tolerovaného prvku je považována za správnou, jestliže prvek leží mezi dvojicí soustředných kružnic v rovině, jejichž radiální vzdálenost je nejvýše rovna hodnotě předepsané tolerance. [4]

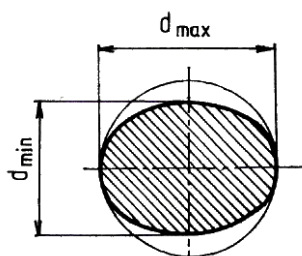
Ta dvojice kružnic, která vykazuje nejmenší radiální vzdálenost, vyhovuje požadavku. Správná je velikost odchylky  $\Delta r_2$  (Obr. 10), která smí být nejvýše rovna předepsané toleranci. [3]



$$\Delta r_2 < \Delta r_1$$

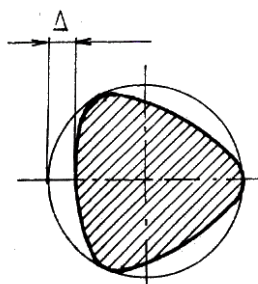
Obr. 10 Umístění středů dvou soustředných kružnic [4]

Specifickým případem kruhovitosti je **ovalita**, jehož profil má tvar oválu. Největší a nejmenší velikost průměru leží ve směrech vzájemně kolmých (Obr. 11). [5]



Obr. 11 Ovalita [5]

Dalším specifickým případem kruhovitosti je **hranolovitost**. Takový profil má tvar mnohohranu a rozlišuje se podle počtu hran. Typickým znakem hranolovitosti s malým počtem hran je stejná hodnota průměru příčných řezů ve všech směrech (Obr. 12). [5]

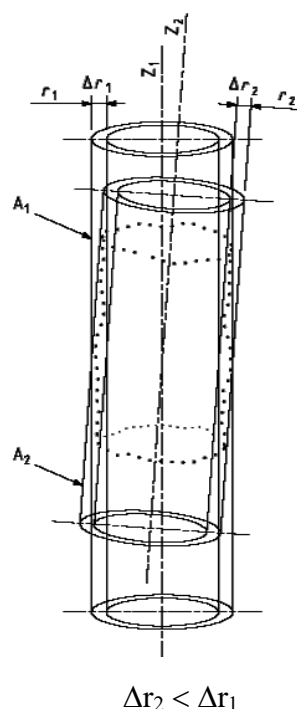


Obr. 12 Hranolovitost [5]

## 2.4 Válcovitost

Válcovitost jednotlivého tolerovaného prvku je považovaná za správnou, jestliže skutečný válec se nachází mezi dvěma souosými válci ideálního geometrického tvaru v prostoru. Rozdíl jejich poloměrů je nejvýše roven radiální vzdálenosti předepsané tolerance válcovitosti [4].

Správné umístění os těchto válců vykazuje nejmenší radiální odchylku  $\Delta r_2$ , která nesmí být větší než předepsaná tolerance válcovitosti (Obr.13).

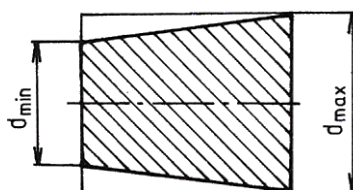


Obr. 13 Válcovitost [4]

Válcovitost je souhrnná odchylka tvaru zahrnující odchylky [5]:

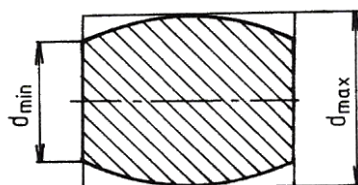
- kruhovitosti příčných řezů,
- přímosti povrchových přímek podélných řezů,
- rovnoběžnosti povrchových přímek s osou obalového válce.

Specifickým případem válcovitosti je **kuželovitost**, kdy povrchové přímky profilu podélného řezu jsou přímé, ale nejsou rovnoběžné (Obr. 14).



Obr. 14 Kuželovitost [5]

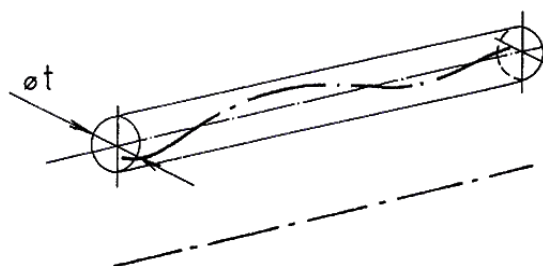
**Soudkovitost** představuje odchylku profilu podélného řezu, kdy povrchové přímky nejsou přímé a průměry jednotlivých příčných řezů se od okrajů ke středu zvětšují (Obr. 15).



Obr. 15 Soudkovitost [5]

## 2.5 Rovnoběžnost //

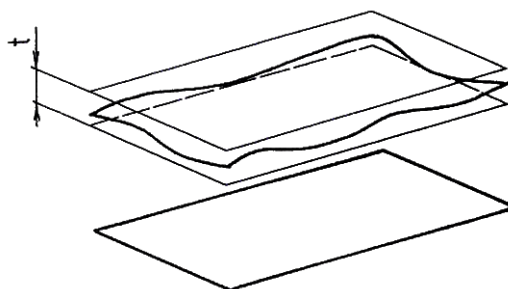
Tolerance rovnoběžnosti může být předepsána pomocí dvou přímek (os). Značka  $\varnothing$  před značkou rovnoběžnosti upřesňuje tvar tolerančního pole na válec o průměru velikosti tolerance  $t$  (Obr. 16). [5]



Obr. 16 Rovnoběžnost osy se základní osou [5]

Tolerance rovnoběžnosti bez označení značky průměru je omezeno dvěma rovinami rovnoběžnými se základní osou ve směru příslušné kóty o velikosti tolerance  $t$ . Předpis tolerance rovnoběžnosti může být:

- roviny s přímkou – toleranční pole definují dvě rovnoběžné roviny vzdáleny od sebe o hodnotu tolerance  $t$  rovnoběžně se základní přímkou.
- přímky a rovinou, dvou rovin – toleranční pole definují dvě rovnoběžné roviny vzdáleny od sebe o hodnotu tolerance  $t$  rovnoběžně se základní rovinou (Obr. 17).



Obr. 17 Rovnoběžnost dvou rovin [5]

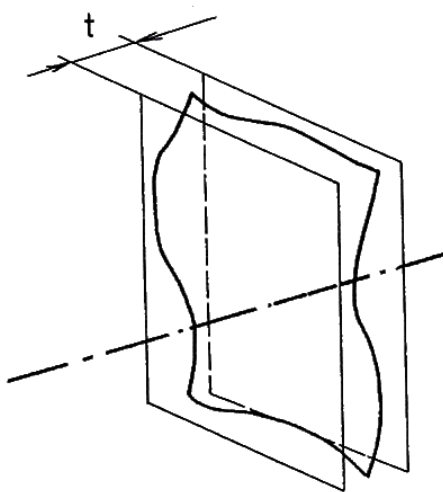
## 2.6 Kolmost $\perp$

Tvar tolerančního pole kolmosti závisí na způsobu předpisu vztažného a vyhodnocovaného prvku [5]:

- **rovina k rovině, rovina k přímce** – toleranční pole vymezují dvě rovnoběžné roviny kolmé k základně (rovině nebo přímce), vzdálenými od sebe o předepsanou toleranci  $t$  (Obr. 18). [5]
- **přímka k rovině** – značka  $\varnothing$  před značkou kolmosti upřesňuje tvar tolerančního pole na válec o průměru velikosti tolerance  $t$ .

Tolerance kolmosti přímky k rovině bez označení značky průměru je omezeno dvěma rovnoběžnými rovinami kolmými k základně vzdálenými od sebe o hodnotu velikosti tolerance  $t$ .

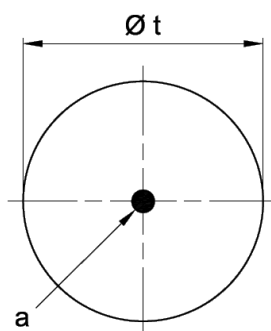
- **přímka k přímce** – toleranční pole vymezují dvě rovnoběžné roviny kolmé k základně (ose), vzdálené od sebe o hodnotu předepsané tolerance  $t$ . [5]



Obr. 18 Kolmost roviny k přímce [5]

## 2.7 Soustřednost, sousost

Značka  $\varnothing$  před značkou **soustřednosti** vymezuje toleranční pole na kruh o průměru  $t$ . Bod základny je shodný se středem kruhového tolerančního pole (Obr. 19). [4]



a – základna

Obr. 19 Soustřednost

Značka  $\varnothing$  před značkou **souososti** vymezuje toleranční pole na válec o průměru  $t$ . Základna  $a$  je shodná s osou válcového tolerančního pole. [4]

## 2.8 Tolerance házení

Souhrnná úchylka tolerance házení zahrnuje vzhledem k základně tvar i polohu jednotlivých bodů tvarové plochy. Jednotlivé tolerance házení zahrnují toleranci: soustřednosti, souososti, kruhovitosti, válcovitosti a kolmosti (sklonu).

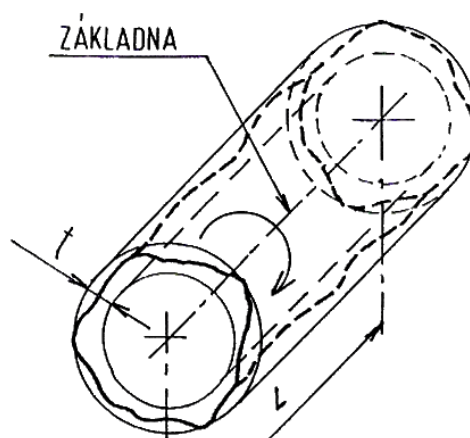
### 2.8.1 Obvodové, celkové obvodové házení

Toleranční pole **obvodového házení (radiálního)** vymezují v libovolném kolmém průřezu k ose základny dvě soustředné kružnice jejichž středy jsou shodné se základnou. Velikost tolerance  $t$  vyjadřuje rozdíl poloměrů soustředných kružnic. [4]



Toleranční pole **celkového obvodového házení** vymezují dva souosé válce jejichž osy jsou shodné se základnou. Velikost tolerance  $t$  vyjadřuje rozdíl poloměrů souosých válců (Obr. 20).

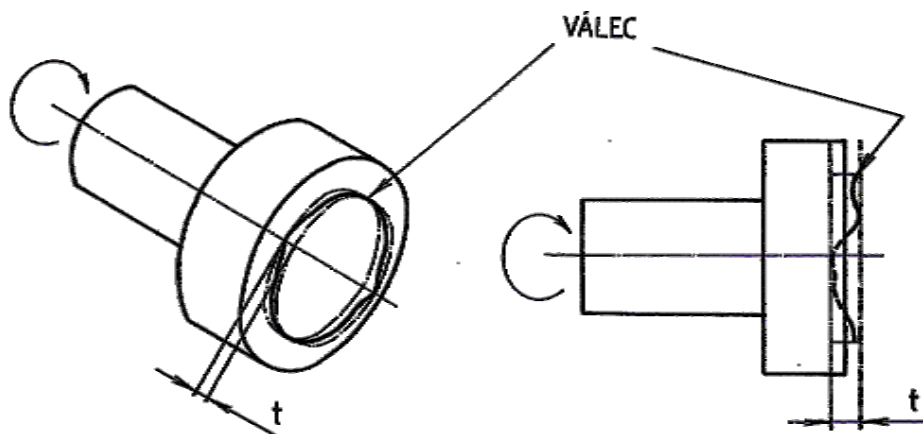
[4]



Obr. 20 Celkové obvodové házení [5]

### 2.8.2 Čelní, celkové čelní házení ↗, ↗↗

Toleranční pole **čelního házení (axiálního)** vymezují v libovolném válcovém průřezu s osou se shodnou základnou dvě kružnice. Velikost tolerance  $t$  vyjadřuje vzdálenost soustředných kružnic (Obr. 21). [4]



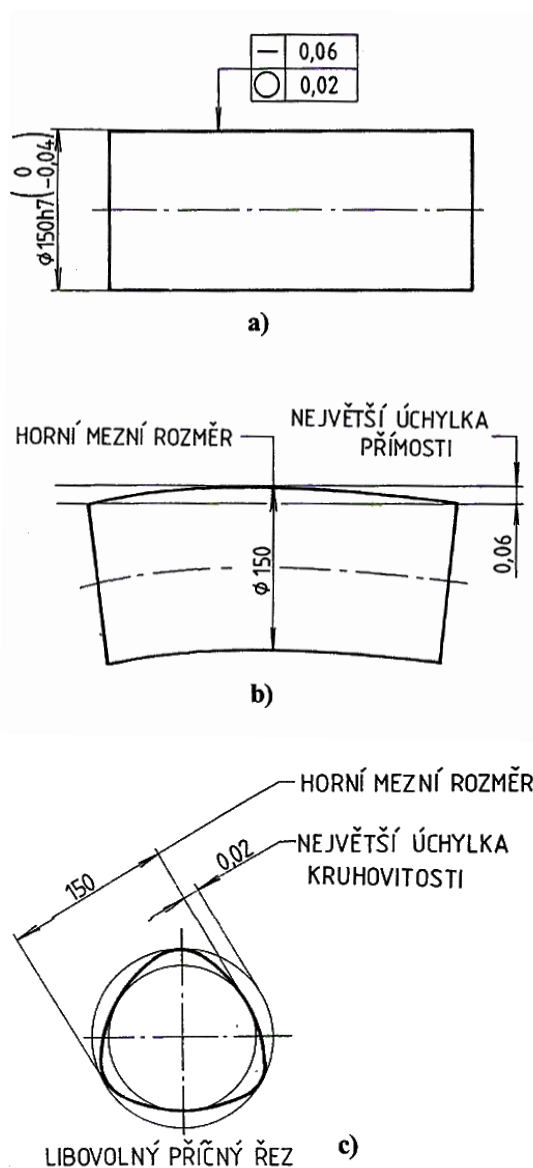
Obr. 21 Kruhové čelní házení [5]

Toleranční pole **celkového čelního házení** vymezují dvě rovnoběžné roviny kolmé k základně vzdálené od sebe o hodnotu velikosti tolerance  $t$ . [4]

## 2.9 Závislé tolerance

Základní pravidlo tolerování podle ČSN EN ISO 8015 *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Základy – Pojmy, principy a pravidla* stanovuje vztah mezi rozměrovými a geometrickými tolerancemi. Pokud je ve výkresové dokumentaci uveden vztah k této normě, platí základní **pravidlo nezávislosti** tolerování. Posuzování délkových, úhlových rozměrů s tolerancemi a geometrických tolerancí probíhá nezávisle na sobě. [5]

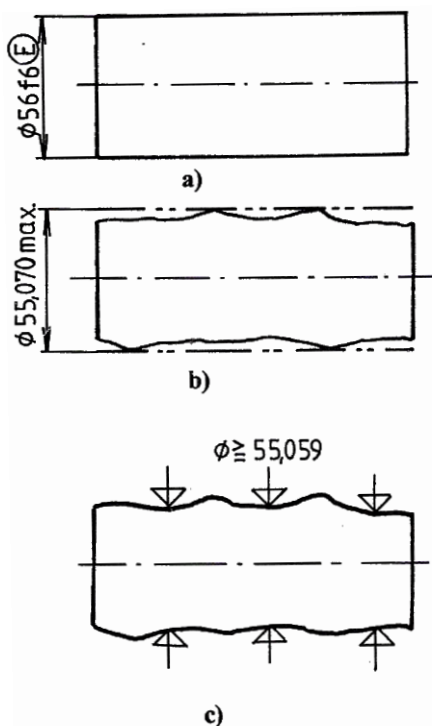
Kontrola mezních úchylek délkových rozměrů probíhá dvoubodovým měřením skutečného místního rozměru. Odchylka geometrické tolerance je posuzovaná bez vztahu k rozměrům prvku (Obr. 22 a,b,c).



Obr. 22 Předpis a výklad nezávislosti tolerance přímosti a kruhovitosti [5]

Pokud jednotlivé součásti budou tvořit vzájemné uložení, uplatňuje se požadavek kontroly obalovou plochou. Předpis požadované kontroly je předepsán znakem  $\textcircled{E}$  za tolerovaným rozměrem (Obr. 23a).

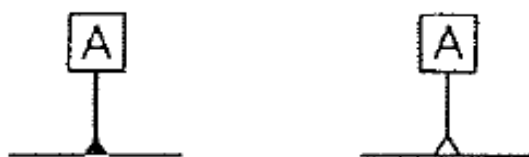
Předpis požadavku kontroly rozměrů pro prvky typu hřídele zní: válcový hřídel musí ležet uvnitř obalového prvku o rozměru velikosti horního mezního rozměru tolerovaného prvku a dolní mezní rozměr je měřen dvoubodově (Obr. 23b,c). [5]



Obr. 23 Předpis požadavku kontroly válcového hřídele obalovou plochou [5]

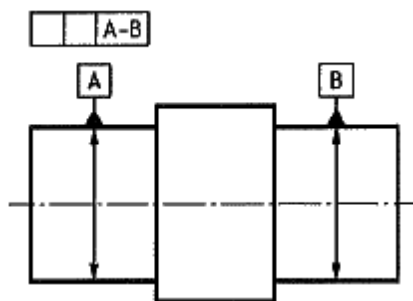
## 2.10 Základny

Geometrické tolerance vztahující se ke dvěma nebo více prvkům vyžadují při vyhodnocení stanovit vztažný (náhradní) prvek – **základnu**. Jednotlivé prvky použité pro ustavení prvků základních, jsou identifikovány orámováním písmeny velké abecedy. Vyplněný nebo prázdný trojúhelník má stejný význam (Obr. 24).



Obr. 24 Označení základen [6]

U rotačních součástí hřídelového typu často tvoří základnu společná osa dvou nebo více **základních prvků** (Obr. 25).



Obr. 25 Základna ze dvou základních prvků [4]

Náhradní prvek (přiřazený prvek) vzniká připasováním z nasnímaného povrchu (základního prvku). Stanovení základny je prováděno připasováním s jednoznačným souborem omezení vedoucím k jedinečné identifikaci základen. Mezinárodní technická norma ČSN EN ISO 5459 *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Geometrické tolerování – Základny a soustavy základen* poskytuje vysvětlení, specifikuje terminologii a metodiku pro pochopení základen a soustav základen. Tato norma jako výchozí kritérium pro základny uvažuje **obalové prvky**. [4]

V odůvodněných případech lze využít stanovení náhradního prvku: **střední prvek nejmenších čtverců** profilu povrchu skutečného prvku nebo **prvek dotykový**. [5]

Základna může být definována **tvarem** (ideální geometrický tvar na výkresu), **směrem** (směrem náhradního prvku) a **umístěním** [5]:

- **roviny** – extrémním bodem základního prvku vně materiálu,
- **osy** válce osou náhradního válce,
- **osy** kužele osou náhradního kužele,
- **středu koule** – průsečíkem os náhradní koule,
- **přímky** – extrémním bodem základního prvku vně materiálu,
- **středem kružnic** – středem náhradní kružnice.

### 3 Analýza metod měření

Ověření zhotovovaných součástí příslušnou metodou měření patří mezi nástroje způsobu doložení následného spolehlivého plnění účelu své zamýšlené funkce. Nepřeberné množství rozmanitých dílců představuje konkrétní specifický přístup pro různé výrobky v samotném výrobní procesu a následném prokázání dosažených tvarových a rozměrových charakteristik. Každá metoda měření vyžaduje určitou technickou úroveň, náročnost na vybavení, nejistotu měření, způsob snímání povrchu a mnoho dalších požadavků. Cílem každé metody měření je věrohodný výstup se specifikovanou nejistotou měření.

Nasnímání celého posuzovaného povrchu představuje pro kompletní posouzení reálného stavu ideální průběh měření. Dokonaleji nasnímaný povrch znamená reálnější výsledek stavu posuzované geometrie. Zvolená metoda měření a použitého zařízení závisí na velikosti příslušné tolerance, rozměru a hmotnosti měřeného dílce, dostupnosti měřicího zařízení, druhu výstupu naměřených dat a mnoha dalších kritériích.

Základní rozdělení metod měření:

- spojitá,
- nespojitá (diskrétní).

#### 3.1 Spojitá metoda

Neustálý kontakt snímače měřicího zařízení s povrchem měřené součásti můžeme považovat za metodu spojitou. Takto získané data představují nejpřesnější výsledky měření s vysokou opakovatelností naměřeného výsledku.

#### 3.2 Nespojitá (diskrétní) metoda

Charakteristickým znakem nespojité metody je přerušovaný kontakt snímače měřicího zařízení s povrchem měřené součásti. V průběhu měření dochází mezi jednotlivými snímanými body k oddálení doteku snímače od posuzované plochy. Měření vykazuje delší časový průběh v porovnání s metodou spojitou. Tento způsob snímání využívají SMS. Podle typu senzoriky, kterou je SMS vybaven, mohou využívat pro nespojitou metodu snímání dotykovou, nebo skenovací sondu v dotykovém režimu. Úplnost výsledku měření posuzovaného povrchu závisí na počtu zvolených bodů snímání měřeného prvku.

### 3.3 Chyby měření

Faktory ovlivňující každé měření komplikují stanovení skutečné hodnoty měřené veličiny. Dochází k určitému rozpětí naměřených hodnot a výsledná naměřená hodnota veličiny nemusí odpovídat skutečnému stavu. Rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny  $x_0$  a naměřenou hodnotou veličiny  $x_i$  nazýváme chybou měření  $\epsilon_i$ . Tuto chybu měření nelze stanovit z důvodu, že skutečnou hodnotu veličiny přesně neznáme, proto je odhadnuta. Mezi hlavní vlivy zatěžující průběh měření patří tyto faktory: metody měření, podmínky měření, druh měřené veličiny, osobní chyby a opotřebení měřidla.

Příčiny vzniku chyb mají nejčastěji charakter **systematický** nebo **náhodný**. Chyby **hrubé** mají charakter odlehlých hodnot [7].

#### 3.3.1 Systematické chyby

Pokud výsledek měření vykazuje pravidelnou odchylku od skutečné hodnoty bez ohledu na počet provedených měření hovoříme o systematické chybě. Systematické chyby ovlivňují správnost výsledku měření. Příčiny systematických chyb mohou například nastat: chybným vynulováním (nastavením) přístroje, obsluhou měřidla, nepřesným (opotřebovaným) měřidlem a nevhodným přitlakem. Tento nebezpečný jev lze nejčastěji zjistit měřením na jiném přístroji.

Pokud zjistíme velikost hodnoty systematické chyby, výsledek měření lze ovlivnit odstraněním této chyby **korekcí** [8]. Jestliže známe příčinu a dobu vzniku systematické chyby, můžeme již pořízené výsledky měření dodatečně korigovat bez nového měření.

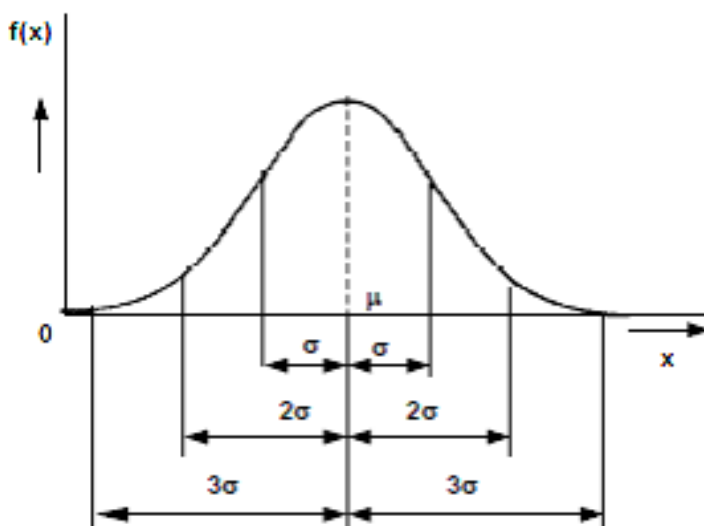
#### 3.3.2 Náhodné chyby

Náhodné chyby vznikají při každém měření a nelze je odstranit. Příčina vzniku má náhodný charakter a při opakovaném měření za stejných podmínek vykazuje rozptýl naměřených hodnot. Průběh těchto chyb lze vyjádřit statisticky, nejčastěji pomocí normálního (Gaussova) rozdělení hustoty pravděpodobnosti (Obr. 26). Normální rozdělení předpokládá stejnou četnost kladných a záporných chyb. Výskyt malých chyb je častější než chyb velkých.

V intervalu  $< -\infty, \infty >$  funkce normálního rozdělení nabývá hodnota  $\mu$  maxima [9]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (1),$$

kde:	$\sigma$	je směrodatná odchylka	[mm],
	$x_i$	jsou dílčí hodnoty	[mm],
	$\mu$	je střední hodnota	[mm].



Obr. 26 Parametry normálního rozdělení [9]

Intervaly pravděpodobnosti [9]:

- interval  $< \mu - \sigma, \mu + \sigma >$  obsahuje 68,27 % náhodné veličiny,
- interval  $< \mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma >$  obsahuje 95,45 % náhodné veličiny,
- interval  $< \mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma >$  obsahuje 99,73 % náhodné veličiny.

Průměr naměřených hodnot:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2),$$

kde:  $\bar{x}$  je průměr hodnot ze souboru [mm],  
 $x_i$  jsou jednotlivé naměřené veličiny [mm],  
 $n$  je počet měření [-].

Rozptyl je charakterizován výběrovou směrodatnou odchylkou:

$$s(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3).$$

Výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru:

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (4).$$

### 3.3.3 Hrubé chyby

Hrubé chyby vznikají z mnoha příčin: nesprávně provedeného měření, nesprávný odečet údajů, chybné vyhodnocení, vada přístroje atd. Těchto výsledků měření bychom se měli vyvarovat. Výsledek měření zatížený touto chybou je nepoužitelný a snadno se přenáší dál. Odhalit hrubou chybu lze nejjednodušší použitím jiného měřidla nebo metody měření. V některých případech lze provést testování „podezřelých“ hodnot ze souboru měření. Výsledky měření zatížené hrubou chybou (velmi často způsobené znečištěním povrchu měřené součásti) je možno za předpokladu normálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti vyloučit.

#### Postup testování odlehlé hodnoty:

Ze souboru naměřených hodnot se nejprve vypočte střední hodnota  $\bar{x}$  (2), výběrová směrodatná odchylka  $s(x)$  (3). Pro posouzení odlehlých hodnot ( $x_2, x_n$ ) se vypočítají normované hodnoty  $H_2, H_n$  ( $x_2 < \bar{x}, x_n > \bar{x}$ ) [8]:

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad (5),$$

$$H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (6).$$

Z tabulky se určí mezní hodnota  $H$  pro stanovenou pravděpodobnost a daný počet měření (Tab. 2).

Vyhodnocením za předpokladu  $H_2 < H$  a  $H_n > H$  hodnota  $x_2$  není zatížená chybou,  $x_n$  je ovlivněna hrubou chybou a ze souboru hodnot bude vyloučena. [8]

Tab. 2 Mezní hodnoty  $H$  pro pravděpodobnost 95 % [8]

Rozsah výběru n	Mezní hodnoty $H$ pro pravděpodobnost p			
	0,90	0,925	0,95	0,975
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,12	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71
25	2,635	2,87	3,351	3,944
30	2,696	2,928	3,402	3,988
40	2,792	3,015	3,48	4,054
50	2,86	3,082	3,541	4,108
100	3,076	3,285	3,723	4,263



### 3.4 Nejistoty měření

Současná definice nejistoty měření zní: „parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje míru rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně prisuzovány měřené veličině“. Soubor chyb měření ovlivňuje samotný výsledek měření a neumožňuje stanovit pravou hodnotu měřené veličiny. Takto zatížený výsledek měření společně s přiřazeným parametrem, poskytuje údaj o předpokládaném rozptylu hodnot, ve kterém se skutečná hodnota nachází. [10].

Vlivy, které přispívají k ovlivnění rozpětí výsledku měření jsou veškeré jevy označené jako **zdroje nejistot** [11]:

- nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny,
- nevhodný výběr přístroje,
- nevhodný výběr vzorků měření,
- nevhodný postup při měření,
- zaokrouhlování,
- linearizace, aproximace, interpolace a extrapolace,
- neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí,
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních,
- subjektivní vlivy obsluhy,
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů.

#### 3.4.1 Standardní nejistota typu A ( $u_A$ )

Standardní nejistotu typu A charakterizuje statistické zpracování dat z opakovaných měření. Hodnota nejistoty typu A klesá s počtem měření. Standardní nejistota se váže na výběrový průměr  $\bar{x}$ . Určení standardní nejistoty typu A probíhá výpočtem směrodatné odchylky:

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (7).$$

Pokud počet opakování měření  $n$  není alespoň 10, buď se určí kvalifikovaný odhad na základě zkušeností, nebo pomocí korekčního koeficientu  $k_{uA}$  (Tab. 3), výpočtem korigované nejistoty  $u_{Ak}$ :

$$u_{Ak} = k_{uA} \cdot s(\bar{x}) \quad (8).$$

Tab. 3 Hodnoty  $k_{uA}$  pro pravděpodobnost 95 % [9]

$n$ [-]	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{uA}$ [-]	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

### 3.4.2 Standardní nejistota typu B ( $u_B$ )

Standardní nejistotu typu **B** charakterizují známé, odhadnuté příčiny a převzaté hodnoty. Výsledná hodnota nejistoty typu **B** nesouvisí s počtem opakovaných měření, ale závisí na zkušenostech a způsobu vyhodnocení.

Výpočet začíná vytipováním zdrojů nejistot typu **B**. Následuje odhad odchylek  $\pm z_{\max}$ , málo pravděpodobných od nominální veličiny. Dále se odhadne jakému rozdělení pravděpodobnosti odpovídá průběh odchylek:

$$u_{Bzi} = \frac{z_{\max}}{\chi} \quad (9),$$

kde velikost hodnoty  $\chi$  závisí na druhu rozdělení:

- normální (Gaussovo):  $\chi = 2 \div 3$ ,
- rovnoměrné:  $\chi = \sqrt{3}$ ,
- trojúhelníkové:  $\chi = \sqrt{6}$ .

Výsledná nejistota typu B je sumarizací:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot u_{Bzi} \right)^2} \quad (10),$$

kde:

$\frac{\partial f}{\partial z_i}$  je parciální derivace funkční závislosti dle zdroje  $z_i$ .

### 3.4.3 Kombinovaná nejistota $u_C$

Sloučením obou typů nejistot A a B dostaneme kombinovanou nejistotu  $u_C$ :

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (11).$$

### 3.4.4 Rozšířená nejistota U

Rozšířením kombinované nejistoty  $u_C$  koeficientem  $k_u = 2$  dosáhne nejistota pokrytí asi 95 %, za předpokladu Gaussova rozdělení a stanovením standardní nejistoty odhadu s dostatečnou spolehlivostí:

$$U = k_u \cdot u_C \quad (12).$$

### 3.5 Maximálně přípustná chyba MPE (Maximum Permissible Error)

Přejímací a periodické zkoušky přesnosti měřicích zařízení zabezpečují soulad s metrologickými požadavky. Aby bylo zřejmé s jakou přesností dokáže měřicí zařízení pracovat, akreditovaný subjekt uvádí v kalibračním protokolu rozšířenou nejistotu měření  $U$ . Stanovená měřidla podléhají ověření, ostatní nestanovená měřidla podléhají periodické kalibraci. SMS výrobci specifikují podle několika charakteristických dovolených chyb měření podle normy ČSN EN ISO 10360. Tato norma obsahuje již 10 částí.

Kalibrace probíhá na místě užívání, neboť velmi citlivé a rozměrné SMS nelze snadno transportovat a výsledky kalibrace by neodpovídaly provozním podmínkám. Každý SMS vyžaduje v závislosti na způsobu využití specifické podmínky, aby byla garantována deklarovaná přesnost. Mezi největší vlivy, které výrazně ovlivňují výsledky měření patří: čistota, teplota, vlhkost vzduchu, hluk a vibrace. Nejpresnější stroje musí být instalovány v laboratorních podmínkách, kde klimatizační jednotka zabezpečuje nejen požadovanou teplotu, ale také dovolené kolísání teploty. Měřicí zařízení jsou umisťovány pokud možno co nejblíže výrobnímu procesu, aby byla možná rychlá reakce proměření výrobků na požadavky výroby. Některá měřicí zařízení jsou instalovaná přímo do výrobní haly. Konstrukčně musí odolávat náročným podmínkám, zejména prašnosti (zakrytáváním funkčních ploch), teplotní stabilitou (využitím nových materiálů, aktivní teplotní kompenzací) a aktivním tlumením vibrací.

#### **$MPE_E$ Maximum Permissible Error for size measurement – maximální dovolená chyba měření délky**

Pro stanovení odchylky délkového rozměru jsou předmětem kalibrace koncové měrky nebo stupňovité koncové měrky. Měření 5 různých délek v 7 pozicích v měřicím rozsahu stroje probíhá celkem **tříkrát** [12]. Stanovené hodnoty se porovnají s hodnotami kalibrace. Odchylka nesmí překročit specifikaci. Obvykle se uvádí specifikace ve tvaru v  $[\mu m]$  [13]:

$$MPE_E = A + L / K \quad (13),$$

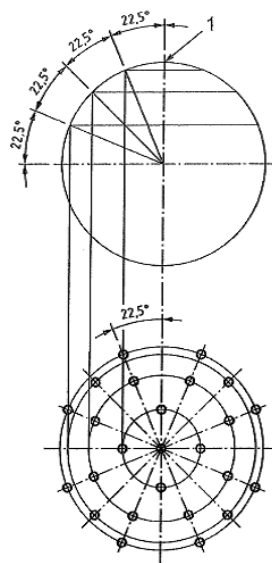
kde:	<b>A</b>	je kladná konstanta	$[\mu m]$ ,
	<b>K</b>	je bezrozměrná konstanta	$[-]$ ,
	<b>L</b>	je měřený rozměr	$[mm]$ .

### **MPE<sub>P</sub> Maximum Permissible Probing Error – maximální dovolená chyba snímání**

Pro stanovení dotykové odchylky se měří koule Ø10 mm až Ø50 mm se zanedbatelnou tvarovou úchylkou na **25** místech. Rozmístění těchto bodů znázorňuje (Obr. 27). Z naměřených hodnot **25** bodů je vypočtena takzvaná Gaussova vyrovnávací koule. Radiální vzdálenosti od vyrovnávací kuličky nesmí překročit specifikaci uváděnou ve tvaru [14]:

$$\text{MPE}_P = A \quad (14),$$

kde: **A** je kladná konstanta [μm].



1 – pól

Obr. 27 Body dotyku [14]

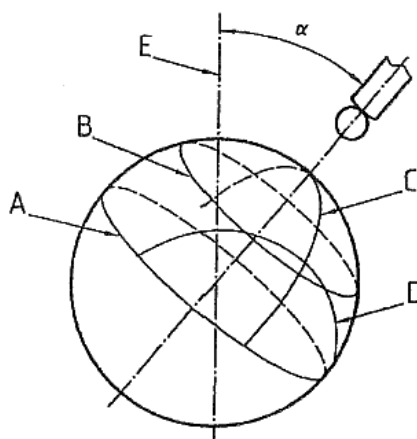
### **MPE<sub>THP</sub> Maximum Permissible Scanning Probing Error – maximální dovolená chyba při skenování**

Pro stanovení snímací odchylky se měří koule Ø 25 mm se zanedbatelnou tvarovou úchylkou skenováním čtyřech stanovených liniích (Obr. 28). Specifikaci

$$\text{MPE}_{THP} = A \quad (15),$$

kde: **A** je kladná konstanta [μm],

musí splnit několik podmínek: radiální vzdálenosti od vyrovnávací kuličky nesmí překročit specifikaci uváděnou ve tvaru: **MPE<sub>THP</sub>**, odchylky mezi radiálními vzdálenostmi a kalibrovaným průměrem kuličky nesmí být větší jako specifikace. Nutné je uvedení času **T** [s], potřebným pro vykonání zkoušky. Tento čas nesmí překročit specifikaci. Tato zkouška představuje výkonnost skenování SMS [15].



- A Cílová skenovací rovina 1
- B Cílová skenovací rovina 2
- C Cílová skenovací rovina 3
- D Cílová skenovací rovina 4
- E Osa pinoly
- $\alpha$  Úhel sklonu stopky snímacího doteku od osy pinoly

Obr. 28 Čtyři cílové skenovací roviny na zkušební kouli [15]

### 3.6 Metody připasování

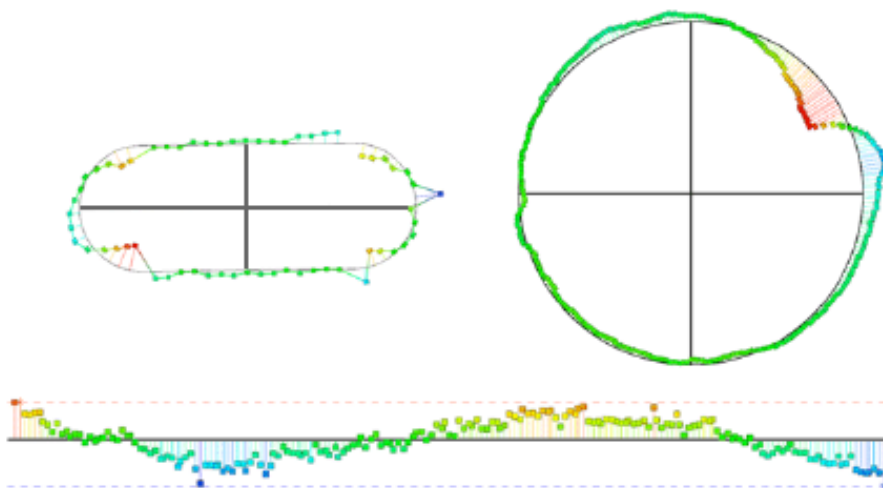
Strategie měření součásti znamená zhodnocení jak důkladně musíme povrch nasnímat aby následné vyhodnocení vyhovovalo kladeným požadavkům. Většinu výrobků tvoří soustava jednoduchých geometrických elementů (válec, rovina, kužel, kružnice a koule), které lze snadno identifikovat a nasnímat. Princip měření je založen na nasnímání povrchu součásti a přiřazení geometricky přesného elementu.

Každý element vyžaduje určitý minimální počet bodů pro jeho identifikaci. Například přímce stačí 2 body, kruhu, rovině 3 a válci 5 nasnímaných bodů. Pro měření je výhodnější použít snímaných bodů o něco více, než je minimum, protože chybně nasnímaný bod nelze odhalit a výrazně může ovlivnit výsledek měření.

Pokud objektem zájmu není element geometrický, snímání probíhá buď v rovině – element neznámá křivka, nebo v prostoru – element obecná plocha. K vyhodnocení v tomto případě slouží porovnání nasnímaného elementu se jmenovitou křivkou, nebo plochou.

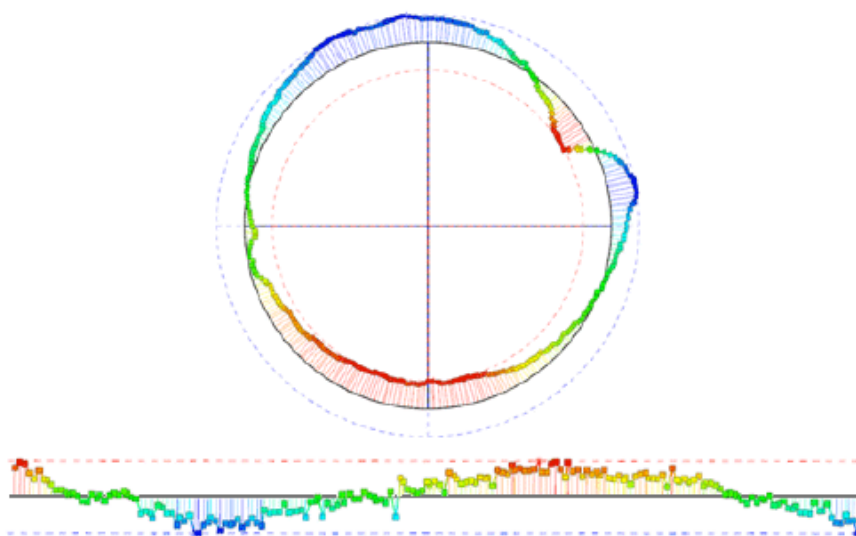
Tvar jmenovitých obecných křivek a rovin poskytují CAD data (nejčastěji prostřednictvím modelu) měřené součásti. Přiřazení prvku probíhá „napasováním“ naměřené množiny bodů nástrojem softwaru **BestFit** a vyhodnocením odchylky tvaru. Referenční kružnice, podle druhu použité metody výpočtu (připisování), vykazují rozdílné výsledné hodnoty velikosti odchylky kruhovitosti posuzovaného profilu.

**Metoda nejmenších čtverců (Gauss) LSC** – Least Square Circle – Součet čtverců odchylek od sejmutého profilu je nejmenší (Obr. 29). Tato metoda výpočtu určí optimální připasovaný element, kdy žádný bod není upřednostněn. Připisování je velmi málo ovlivněno odlehlými hodnotami sejmutých bodů. Při malém množství nasnímaných bodů je tato metoda standardním způsobem připasování. [16]



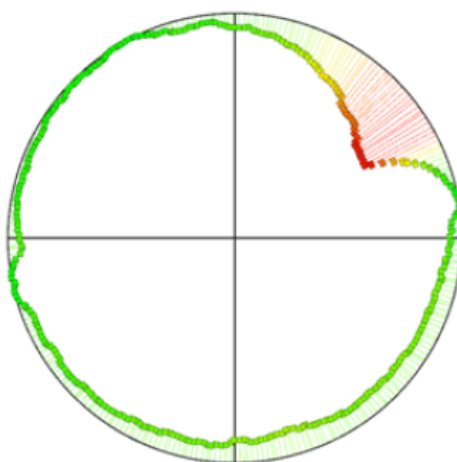
Obr. 29 Metoda připasování podle Gausse [16]

**Nejmenší pásmo (Tšebyšev) MZC** – Minimum Zone Circle – připasování podle Tšebyševa probíhá tak, abychom získali co nejmenší maximální odchylku. Maximální a minimální odchylka má stejnou velikost (Obr. 30). [16]



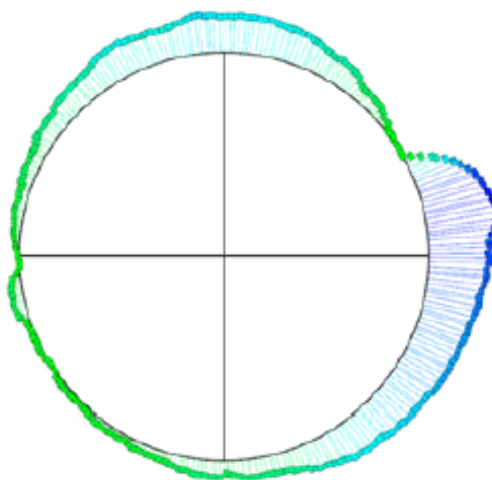
Obr. 30 Metoda připasování podle Tšebyševa [16]

**Minimální opsaná kružnice MCC** – Minimum Circumscribed Circle – nejmenší možná kružnice zakreslená okolo vnějšího sejmutého povrchu. Opsaný element je umístěn tak, aby všechny naměřené body ležely uvnitř tohoto elementu. Používá se pro vyhodnocení hřídelů, které budou montovány do otvorů nebo pro vytvoření základny (Obr. 31). Cílový element je vytvořen na základě extrémních hodnot. [16]



Obr. 31 Metoda připasování nejmenší opsané kružnice [16]

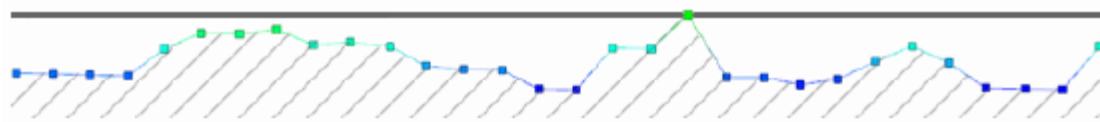
**Maximální vepsaná kružnice (MIC** – Maximal Inscribed Circle) – největší možná kružnice zakreslená do vnitřního sejmutého povrchu. Vepsaný element je umístěn tak, aby všechny naměřené body ležely mimo tento element. Používá se pro vyhodnocení otvorů, do kterých budou montovány hřídele nebo pro vytvoření základny (Obr. 32). Cílový element je vytvořen na základě extrémních hodnot. [16]



Obr. 32 Metoda připasování největší vepsané kružnice [16]

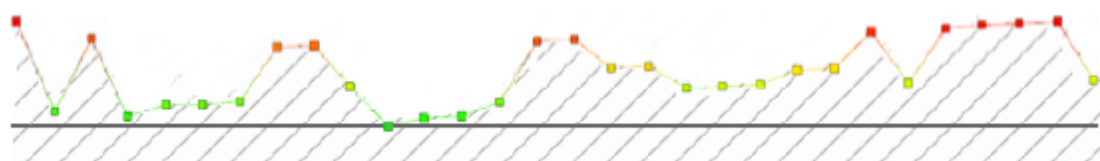
Pro prvky: přímka a rovina nabízí možnost výpočtu tangenciálního prvku.

**V tangentě** – tangenciální element je umístěn v nejvzdálenějším bodě nasnímané kontury od výrobku, rovnoběžně s Tšebyševovým prvkem. Cílový element je vytvořen na základě extrémních hodnot (Obr. 33). [16].



Obr. 33 Metoda připasování v tangentě [16]

**Mimo tangentu** – tangenciální element je umístěn v nejbližším bodě nasnímané kontury od výrobku, rovnoběžně s Tšebyševovým prvkem. Cílový element je vytvořen na základě extrémních hodnot (Obr. 34). [16].



Obr. 34 Metoda připasování mimo tangentu [16]

### 3.7 Eliminace odlehlých hodnot a filtrace

V závislosti na vyhodnocované charakteristice, způsobu výpočtu posuzované veličiny, počtu nasnímaných bodů a mnoha dalších faktorů, mohou odlehlé hodnoty výrazně ovlivnit výsledek měření. V případě vyhodnocení např. délkového rozměru dvou rovnoběžných rovin pomocí SMS, má rozhodující význam počet bodů a způsob vyhodnocení.

Samotné vyhodnocení může vycházet z jednoho naměřeného bodu každé roviny: bod roviny číslo 1 x bod roviny číslo 2. Z těchto dvou bodů lze vyhodnotit jejich vzdálenost, ale nelze odhalit z jednoho měření, zda není vyhodnocována odlehlá hodnota. Opakované měření slouží ke zjištění opakovatelnosti a k posouzení podezřelých odlehlých hodnot.

Naměřením rovin více body, než postačuje k minimální definici prvku, získáme nejen více možností využití těchto dat, ale také údaj rozpětí měřeného elementu a dále lze posuzovat případné anomálie. Takto nasnímané roviny lze vyhodnotit více způsoby. V závislosti na souřadném systému je možností využití těžiště nasnímaných rovin – vyhodnocení bod těžiště

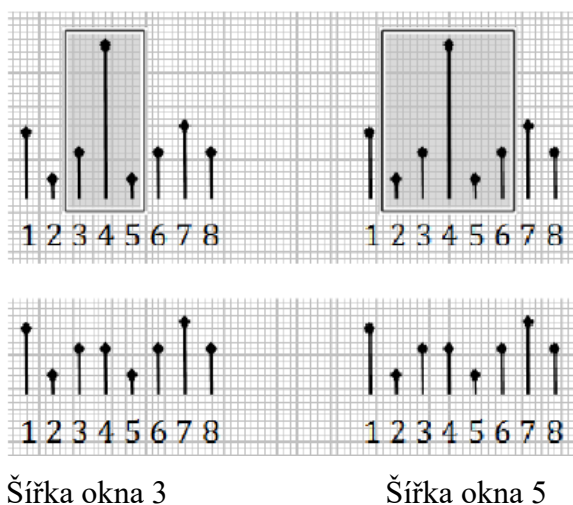


roviny číslo 1 x bod těžiště roviny číslo 2. Další možností je vyhodnocení rovina číslo 1 x rovina číslo 2. Tento způsob již nezohledňuje souřadný systém součásti, ale kolmou vzdálenost vyhodnocovaných rovin. Tato možnost již poskytuje rozdílné výsledky měření v závislosti na variantě vztažná x vyhodnocovaná rovina.

Využití vyhodnocení pomocí obalových prvků – tangenciálních elementů v případě funkčních ploch zaručí požadovanou smontovatelnost. Tam, kde předpis požaduje kontrolu na obalovou plochu za příslušnou toleranci je uveden znak  $\textcircled{E}$  [5].

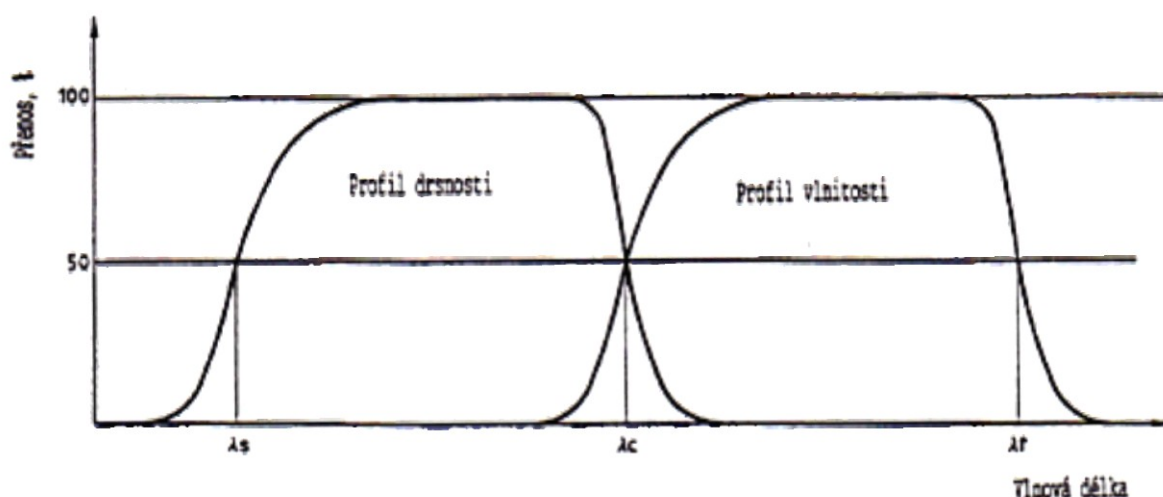
**Eliminace** odlehlých hodnot při nízkém počtu naměřených bodů není doporučena. Mohou být odstraněny také reálně nasnímané body a spolu s odlehlou hodnotou odstraněny. Také takto vyhodnocená data mohou poskytovat chybná a zkreslená data.

Software Metrosoft Quartis nabízí možnost eliminace odlehlých hodnot. Volba funkce „medián“ nabízí na základě předem nastavené šířky okna (3, 5, 7 a 9) odstranění odlehlých hodnot těchto oken. Podle zvolené šíře okna je potlačena (nahrazeno mediánem) (Obr. 35) 1 hodnota pro šíři okna 3, 2 hodnoty pro šíři okna 5, 3 hodnoty pro šíři okna 7 nebo 4 hodnoty pro šíři okna 9 [16].



Obr. 35 Způsob eliminace odlehlých hodnot [16]

Kontura získaná kontinuálním snímáním (skenováním) obsahuje velké množství bodů, obsahující složky krátkovlnné (drsnost), vlnitost a samotný profil (Obr. 36). V závislosti na poloze měření, použitém doteku (průměr, materiálu, tuhosti), prodloužení, rychlosti skenování, drsnosti materiálu, tvrdosti, vlastností a charakteristik snímacího systému obsahuje záznam měření nežádoucí složky. Odstraněním těchto složek získáme obraz reálného stavu měřeného povrchu.



Obr. 36 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [17]

Faktory ovlivňující zvolený počet bodů je vždy kompromis mezi dobou měření a získání přehledu o stavu povrchu součásti. Pro použití filtrů je vždy doporučeno pouze pro vysoký počet bodů (skenování).

Různé druhy filtrů mohou oddělit profil vlnitosti posuzovaného profilu od drsnosti povrchu. Nejčastěji využívaným typem je **Gaussův**, dále **Spline** a **2 RC** filtr. Podle propustnosti lze filtraci rozdělit na: nízkopásmovou (dolní propustnost), pásmová propustnost a vysokopásmovou (horní propustnost).

#### Nízkopásmový filtr

Při filtrování nízkopásmovým filtrem (dolní propustnost) nízké frekvence projdou filtrem, vysoké však nepropustí. Vlivy drsnosti povrchu jsou potlačeny a ve výsledku je zahrnuta vlnitost a ostatní dlouhovlnné složky profilu. Tento filtr umožní získat profil pro hodnocení tvaru a vlnitosti.

#### Vysokopásmový filtr

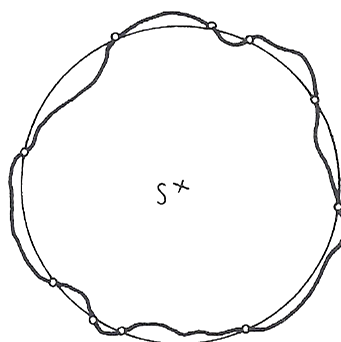
Při filtrování vysokopásmovým filtrem (horní propustnost) vysoké frekvence projdou filtrem, nízké však nepropustí. Vlivy vlnitosti jsou potlačeny a ve výsledku je zahrnuta drsnost povrchu profilu.

#### Pásmová propustnost

Kombinací nízkopásmového a vysokopásmového filtru vzniká pásmová propustnost. Dlouhovlnné i krátkovlnné podíly jsou potlačeny.

#### Počet průchodů nulou, počet vln

Počet průchodů nulou  $NN$  je dán množstvím průsečíků skutečného profilu a středního profilu po obvodu nebo na vztažném úseku (Obr. 37) [5].



Obr. 37 Počet průchodů nulou skutečného kruhového profilu [5]

Počet vln NW je množství vln po obvodu rotační plochy vymezený třemi sousedícími průsečíky [5].

$$NW = NN / 2 \quad (16).$$

Nasnímaný profil je ovlivněn použitým průměrem hrotu použitého doteku (průměrem kuličky).

### Mechanická (morfologická) filtrace

Pomocí vhodně zvoleného průměru doteku lze odstranit podíly drsnosti tím, že se dotek nemůže vnořit do prohlubní vln a tím dochází k vyhlazení nasnímaného profilu. Neúměrně velký průměr doteku může filtrovat také podíly vlnitosti, proto nevhodným výběrem průměru doteku lze ovlivnit výsledek měření odchylek geometrií. V závislosti na průměru doteku, hloubce vln a počet vln na otáčku uvádí oborové normy doporučené minimální vnitřní nebo vnější průměry měřené součásti.

Úspěšné použití **Gaussova filtru** vyžaduje minimálně 7 bodů na vlnu. Tato skutečnost vyžaduje určité minimální množství nasnímaných bodů v závislosti na tvaru povrchu. Stupeň filtru CWL (ořezání vlnové délky) (Tab. 4) pro přímky nebo W/C (ořezání čísla vlny) (Tab. 5) pro kruh nebo válec určuje intenzitu filtrace (Tab. 5) [16].

Tab. 4 Doporučený práh vlnové délky [16]




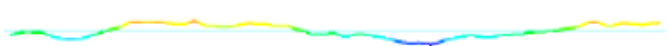
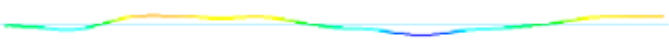
Práh vlnové délky [mm]	Počet bodů na mm [-]	Vzdálenost bodů [mm]
0,25	> 28	0,036
0,80	> 8,75	0,114
2,50	> 2,8	0,357
8,00	> 0,875	1,143

Tab. 5 Doporučený počet vln na obvod [16]

Pouze pro vyhodnocení			Pro vyhodnocení tvaru a vlnitosti	
Průměr [mm]	Vlny na obvod [W/U] [-]	Počet bodů na amplitudu [-]	Vlny na obvod [W/U] [-]	Počet bodů na amplitudu [-]
Do 25	15	> 105	50	> 350
> 25 do 80	50	> 350	150	> 1050
> 80 do 250	150	> 1050	500	> 3500
> 250	500	> 3500	1500	> 10500

Větší počet vln po obvodu (W/C) znamená menší intenzitu filtrace, větší práh vlnové délky (CWL) znamená filtraci větší (Tab. 6).

Tab. 6 Přímka s 2000 body a délkou 60 mm (s provedenou eliminací odlehlých hodnot) [16]

nefiltrované	
CWL = 0.25mm	
CWL = 0.80mm	
CWL = 2.50mm	
CWL = 8.00mm	

## 4 Měřicí technika pro hodnocení geometrií

Geometrie lze kontrolovat již v průběhu výroby. Stále častěji výrobní zařízení disponují obrobkovou sondou, které buď v průběhu výroby, nebo po dokončení příslušné operace slouží k proměření součásti. Takto získané výsledky měření slouží nejen ke korekcím rozměrů, ale data využívají statistická hodnocení. Výhodou obrobkových sond je průběžné sledování jednotlivých operací bez rozepnutí obrobku. Nevýhodou je nižší přesnost měření, ovlivnění výsledků měření konstrukcí stroje a prostředím. Dále je zapotřebí počítat s dobou měření, kdy zařízení nemůže provádět výrobní operace (Obr. 38).



Obr. 38 Obrobková sonda OSP60 [18]

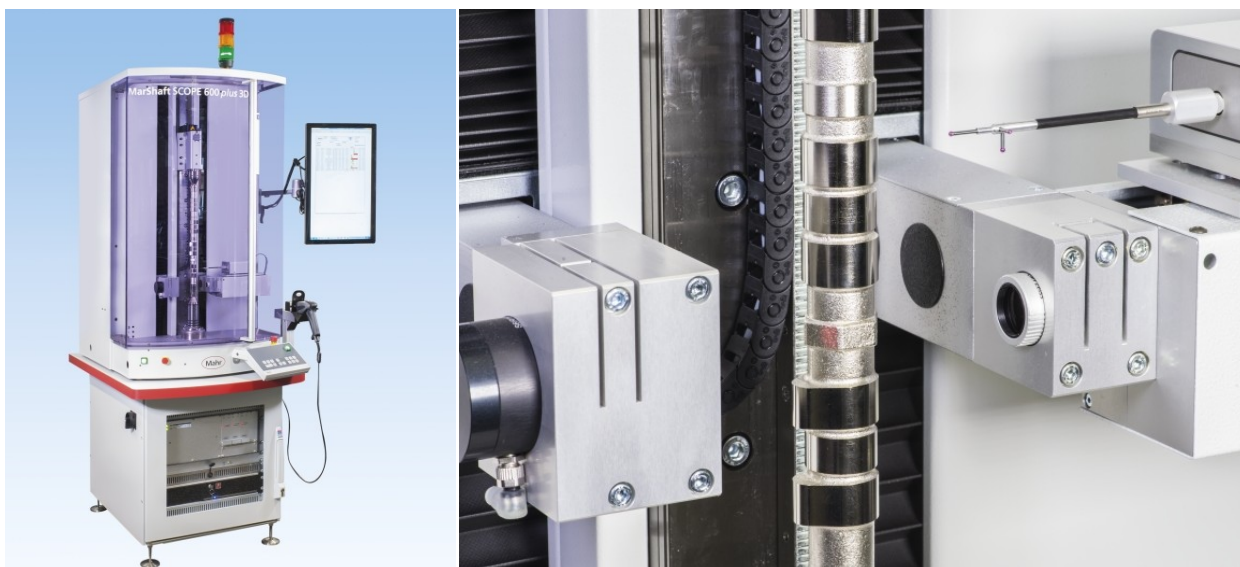
Pro důkladnější kontrolu slouží dílenská měřicí zařízení umístěné v dosahu obráběcích strojů (Obr. 39). Tato zařízení umožňují důkladnější, přesnější a podrobnější kontrolu vyrobených součástí. Výsledkem sledování naměřených dat může být také hospodárný způsob využívání řezných nástrojů a předcházení destrukcí břitových destiček.



Obr. 39 Umístění optického měřicího přístroje do provozu [19]

Ve výrobě se geometrie nejsnadněji ověřují číselníkovými úchylkoměry. Upnutí ve stroji nabízí základní rychlou a levnou kontrolu, neumožňuje však datový výstup.

Důkladnější kontrolu umožňují měřicí zařízení umístěná v klimatizovaných laboratořích. Nejpřesnější zařízení pro měření geometrií (kruhovitosti, válcovitosti, házivosti, atd.) jsou konvenční přístroje (Obr. 40) a mohou také kombinovat optickou a dotekovou technologii.



Obr. 40 MarShaft rozsahu 600 plus 3D [20]

Optické systémy nabízí rychlé, ale méně přesné měření (v jednotkách  $\mu\text{m}$ ) a umožňují snadnější programování s minimalizací kolize bez opotřebení snímacího zařízení. U některých systémů se vyskytují komplikace s odlesky. Dotekové systémy však spolehlivě mechanickým kontaktem umožní přenos skutečné kontury do podoby vyhodnocených výsledků měření. Dotekové konvenční stroje vykazují vyšší přesnosti (v setinách  $\mu\text{m}$ ). Omezení představuje rozsah měření a především nosnost otočného stolu. Velmi přesná aerostatická ložiska umožní těmto přístrojům nosnost v desítkách kg. Pro rozměrnější (nad 1250 mm) a těžší obrobky nenabízí jednotliví výrobci standardní konvenční přístroje, ale nabízí speciální přístroje stavěné přímo pro dané součásti. Výrobci měřicí techniky nabízí nepřeberné množství konvenčních strojů.

Mezi nejuniverzálnější stroje patří souřadnicové měřicí stroje. Mají své limity, ale jejich univerzálnost v jenom přístroji umožňuje jejich častější využití. Přesnost proti konvenčním přístrojům (v jednotkách  $\mu\text{m}$ ) mnohdy plně postačuje měřicí úloze. Výrobci jejich přesnost neustále zdokonalují a v kombinaci s vhodným softwarem poskytují uspokojivé výsledky měření.

## 4.1 Souřadnicový měřicí stroj

SMS (Obr. 41) je univerzální měřicí zařízení určené pro měření prostorových souřadnic. Vyhodnocení nasnímaných souřadnic (kartézských nebo polárních) pomocí softwaru umožní ověřit geometrickou a rozměrovou přesnost měřené součásti.



Obr. 41 SMS Wenzel LH 1210 [21]

**Rozdělení SMS podle typu geometrického uspořádání [22]:**

- **stojanový typ,**
- **výložníkový typ,**
- **portálový typ,**
- **mostový typ.**

**Základní prvky SMS [9]:**

- **rám:** nejčastěji svařenec vykazující velkou tuhost při statickém i dynamickém zatížení.
- **stůl:** granitová deska osazená závitovými pouzdry pro ustavení měřeného dílce. Součástí granitové desky bývá pojezdová část stroje opracovaná lapováním s velmi vysokou přesností.
- **sloup, portál, most:** dostatečně tuhá odlehčená konstrukce umožňující vyšší dynamiku pohyblivých částí.
- **pinola:** nejčastěji využívaným materiálem je granit, keramika, uhlíková vlákna nebo ocel kruhového nebo čtvercového průřezu.



**Senzorika:**

Vlastnosti a použití SMS výrazně ovlivňuje použitá senzorika. Stejný stroj vybaven rozdílnou senzorikou vykazuje rozdílné vlastnosti nejen v možnostech měření, ale také v nejistotě měření a dynamice stroje.

**Základní druhy využívané senzoriky:**

- spínací dotykové sondy (Obr. 42),
- skenovací sondy aktivní i pasivní (Obr. 43, 44),
- senzory zpracování obrazu (Obr. 45),
- laserové senzory (Obr. 46),
- snímače drsnosti povrchu (Obr. 47).



Obr. 42 Tenzometrická sonda TP200 [23]

Aktivní dotekové skenování od firmy Carl Zeiss senzorem VAST gold využívá až 800 mm dlouhé a až 600 g vážící snímače. Konstantní snímací síla 50 mN až 1000 mN je programovatelná s ohledem na geometrii snímače a materiálu součásti. Dynamické tlumení, možnost asymetrických konfigurací a integrovaná ochrana proti kolizi umožňuje využití v nepřetržitém provozu. [24]



Obr. 43 Senzor pro aktivní skenování VAST gold [24]





Obr. 44 Skenovací sonda SP80 [25]



Obr. 45 Otočný senzor s bílým světlem ZEISS DotScan [26]

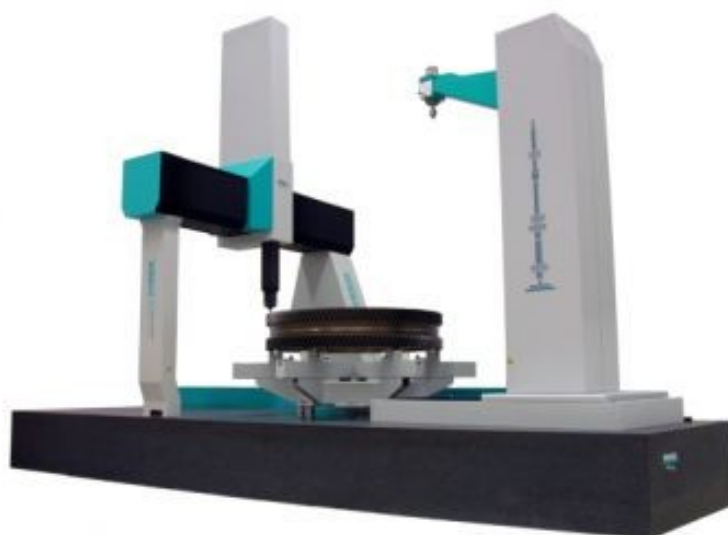


Obr. 46 3D Line skener Shapetracer [27]



Obr. 47 Snímač drsnosti povrchu Zeiss rotos [28]

Souřadnicové stroje portálového typu nachází uplatnění při měření základních dílů skříňového, prizmatického typu, ozubených kol a velkých hřídelů. Otočný stůl s koníkem u strojů typu LH Hybrid (Obr. 48) umožní splnit náročné požadavky měření specifických dílců. Aerostatický nebo hydrostatický otočný stůl umožní zatížení až 8000 kg. [29]



Obr. 48 Hybridní 3D stroj typu LH [29]

## 5 Experimentální část

Experimentální část se zabývá porovnáním a statistickým zhodnocením naměřených hodnot jednotlivých geometrií nápravy na třech různých měřicích zařízeních. Náprava byla 10 krát proměřena SMS Wenzel LH 1512 s dotykovou senzorikou TP200, měřicí stanicí Amest KS 578 a SMS Wenzel LH 1512 senzorikou SP80. Podrobnější analýza geometrií nápravy probíhala se skenovací senzorikou SP80 využitím skenovacího a dotekového režimu. V jednotlivých režimech proběhlo měření bez použití filtrace a eliminace odlehlých bodů, dále dle možností s filtrací nebo eliminací a jejich kombinací.

### 5.1.1 Měření nápravy na SMS

Ustavení nápravy na SMS je prováděno do prizmatických podpěrek. Tyto podpěrky zajišťují bezpečné a jednoznačné usazení měřeného dílce. Jakékoliv posunutí nebo pootočení v průběhu měření není žádoucí na rozdíl od zařízení vybavenými otočnými systémy. Také SMS mohou být vybaveny otočnými systémy, ale stávají se tak méně univerzálními a pořízení těchto systémů představuje vysokou finanční zátěž.

Základem úspěšného měření je minimalizace podmínek, které mohou výsledek měření ovlivnit. Dodržení výrobcem stanovených podmínek použití dané technologie zabezpečuje laboratorní prostředí. Cílené udržování stanoveného rozsahu teplot ovlivní schopnosti stroje největší mírou. Také vlhkost prostředí, hluk a vibrace ovlivňují průběh měření.

Měření nápravy bylo provedeno ve firmě BTG pomocí SMS portálového typu Wenzel LH 1512 (Obr. 49). Konstrukce stolu, traverzy portálu a pinoly je ze stejného materiálu – granitu. Tato konstrukce zaručuje stejné vlastnosti, zejména termické ve všech třech osách.

#### **Parametry SMS Wenzel LH 1512 se senzorikou TP200:**

##### **Měřicí rozsah:**

- osa X: 1500 mm.
- osa Y: 3000 mm.
- osa Z: 1200 mm.

##### **Snímací systém:**

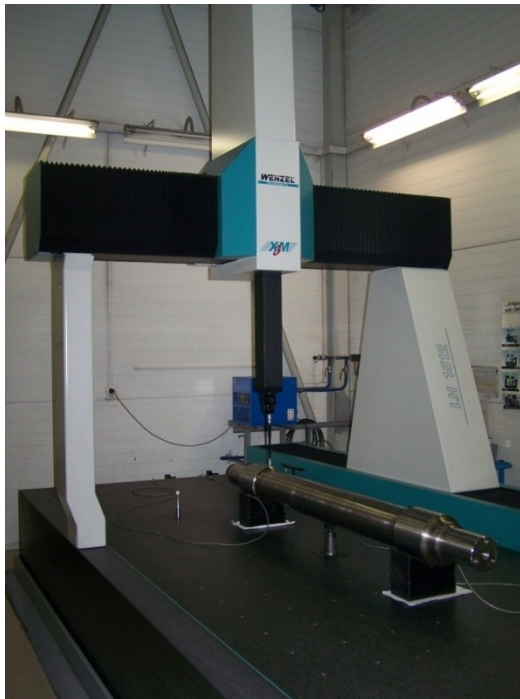
- motorická indexovatelná hlavička: PH10M.
- měřicí sonda: TP200.
- průměr doteku: 6 mm.
- délka doteku: 50 mm.

**Maximální hmotnost měřeného dílu:** 4000 kg.

**Maximální dovolená chyba měření délky:**  $MPE_E = 3,2 \mu\text{m} + (L / 300,0 \text{ mm})$ , kde L je v [mm].

**Maximální dovolená chyba snímání:**  $MPE_P = 3,2 \mu\text{m}$ .

**Měřicí software:** Metrosoft CM 3.90.



Obr. 49 Měření nápravy na SMS Wenzel LH 1512 se senzorikou TP200

**Parametry SMS Wenzel LH 1512 se senzorikou SP80 (Obr. 50):**

**Měřicí rozsah:**

- osa X: 1500 mm.
- osa Y: 3000 mm.
- osa Z: 1200 mm.

**Snímací systém:**

- měřicí sonda: SP80.
- průměr doteku: 5 mm.
- délka doteku: 50 mm.
- délka prodloužení: 50 mm + 100 mm.

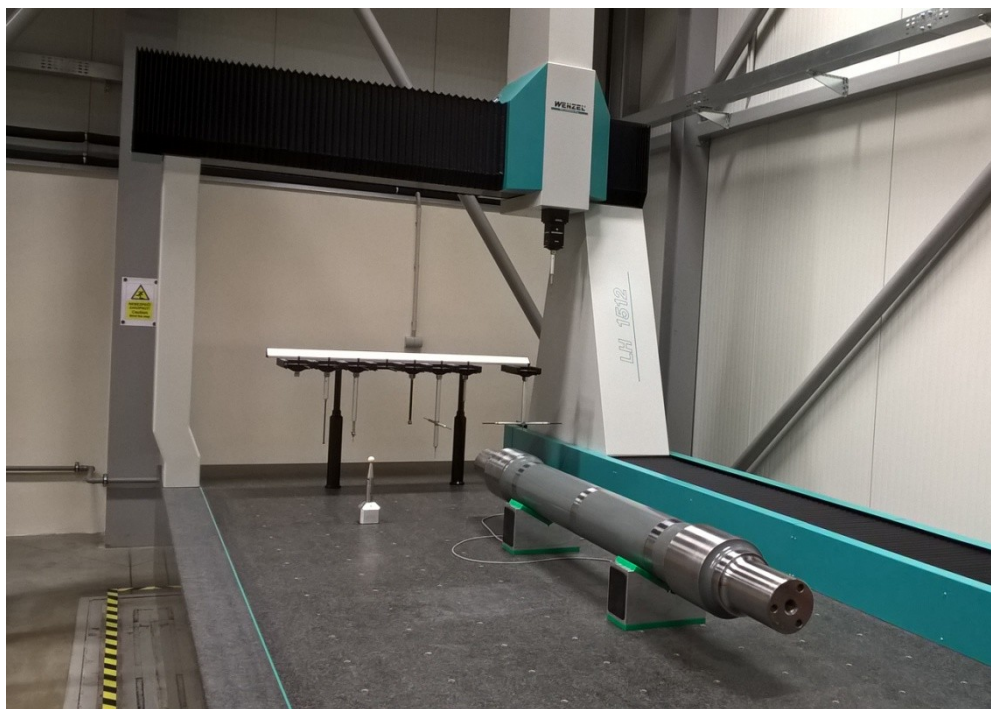
**Maximální hmotnost měřeného dílu:** 4000 kg.

**Maximální dovolená chyba měření délky:**  $MPE_E = 2,6 \mu\text{m} + (L / 350,0 \text{ mm})$ , kde L je v [mm].

**Maximální dovolená chyba snímání:**  $MPE_P = 2,6 \mu\text{m}$ .

**Maximální dovolená chyba při skenování:**  $MPE_{THP} = 3,2 \mu\text{m}$ .

**Měřicí software:** Metrosoft QUARTIS R12.



Obr. 50 Měření nápravy na SMS Wenzel LH 1512 se senzorikou SP80

## 5.2 Měření nápravy na měřicí stanici AMEST KS-578

Automatická měřicí stanice Amest KS-578 (Obr. 51) je určena pro rozměrovou a geometrickou kontrolu hřídelových součástí. Lineární vedení s odměřováním umožňuje měření ve velkém rozsahu rozměrů a krátkém časovém cyklu. Měřená součást je ustavena mezi hroty. Tento způsob upnutí zabezpečuje vysokou přesnost ustavení s minimalizací poškození funkčních částí obrobku. Horizontální umístění osy měření také usnadňuje manipulaci s měřenou součástí. Vyhodnocení měření na principu plovoucí báze eliminuje vliv nepřesností upínacího zařízení. Systém tvoří čtveřice samostatně měřících jednotek (ramen). Každá jednotka umožňuje měření v radiálním i axiálním směru. [30]

### Rozsah rozměrů měřených součástí:

- průměry čepů:  $90 \div 300$  mm,
- délky:  $1800 \div 2550$  mm,
- hmotnost: do 1000 kg.

**Průměr použitého dotyku:** 8 mm.

### Opakovatelnost měření:

- průměry:  $\pm 0,5$   $\mu\text{m}$ ,
- délky:  $\pm 1$   $\mu\text{m}$ .

**Měřicí software:** KS-578.

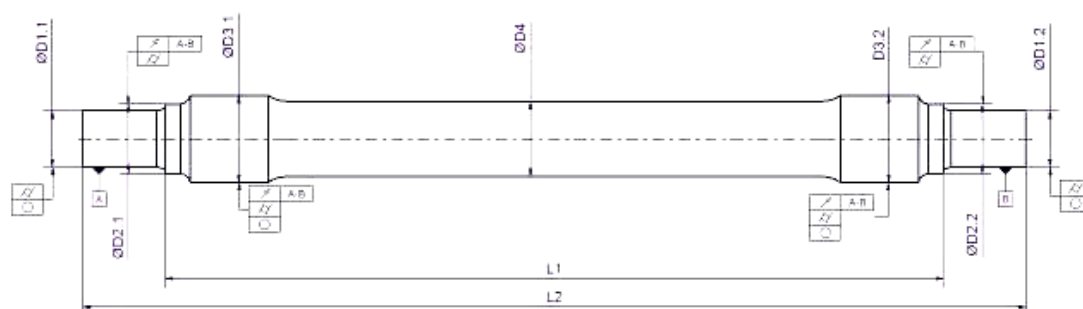




Obr. 51 Automatická měřicí stanice Amest KS-578

**Měřené parametry (Obr. 52):**

- průměry,
- délky,
- kruhovitosti,
- válcovitosti,
- radiální házivosti,
- čelní házivosti,
- rovnoběžnosti čelních ploch,
- rádiusy.



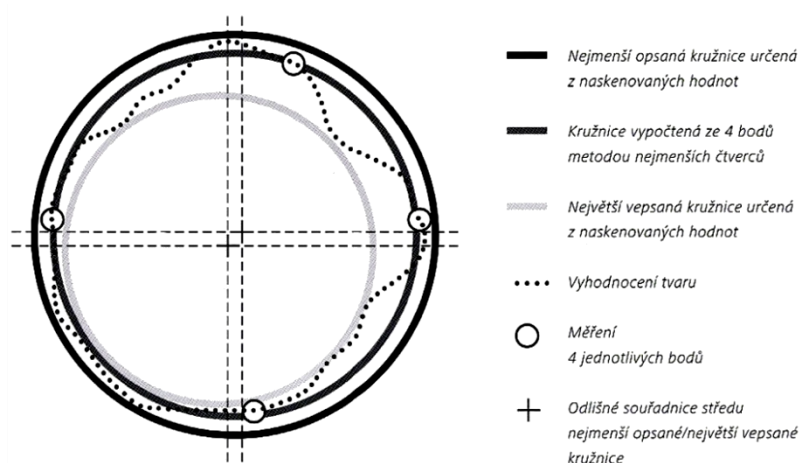
Obr. 52 Příklad měřených parametrů [30]

Měření jednotlivých elementů pro vyhodnocení posuzovaných geometrií bylo provedeno ve skenovacím režimu použitých sond. Pro snímání kritických elementů (čep a sedlo) bylo použito tří příčných řezů.

### 5.3 Výsledky měření

Měření jednotlivých elementů pro vyhodnocení posuzovaných geometrií bylo provedeno u obou SMS v dotykovém režimu sondy metodou příčných řezů 16 body v jednotlivých řezech (Obr. 49, Obr. 50). Pro snímání kritických elementů (čep a sedlo) bylo použito třech řezů.

Naměřené hodnoty deseti měření posuzovaných geometrií železniční nápravy z obou měřících zařízení jsou uvedeny v tabulkách a grafech. Vyhodnocení bylo provedeno metodou referenčních kružnic (LSC) - součet nejmenších čtverců. Tato metoda je vhodná nenáchylností k extrémním hodnotám (špičkám) kdy nedochází k výraznému posunu středu vyhodnocované kružnice jako například u metody minimální opsané kružnice (MCC) nebo u metody nejmenšího pásma (Tšebyševa) (MZC) (Obr. 53).



Obr. 53 Vliv metody výpočtu přiřazeného prvku [31]

#### Použitý vzorec:

Rozpětí naměřených hodnot:

$$\text{Rozpětí} = \text{Max.} - \text{Min.} \quad (17),$$

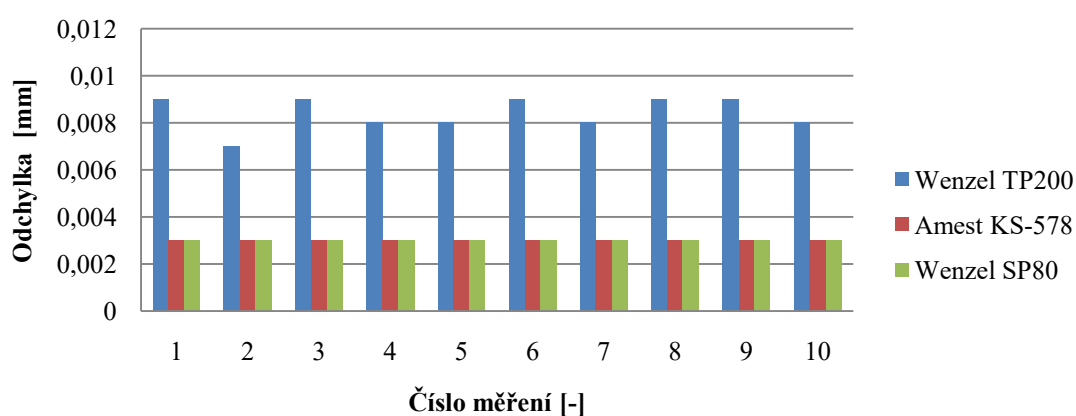
kde:	Rozpětí	je rozpětí hodnot ze souboru	[mm],
	Max.	je maximální hodnota ze souboru	[mm],
	Min.	je minimální hodnota ze souboru	[mm].

Měření bylo provedeno na obou SMS ve shodných rovinách snímání v dotekovém režimu (Tab. 7 až 12) desetkrát. U SMS Wenzel TP200 byl použit dotek  $\varnothing 6$  mm délky 50 mm. U SMS Wenzel SP80 bylo použito doteku  $\varnothing 5$  mm délky 50 mm s prodloužením délky 50 mm + 100 mm. SMS Wenzel TP200 byl naprogramován pro měření jednotlivých elementů (válců a kruhů) ve výšce  $180^\circ$ . SMS Wenzel SP80 byl naprogramován pro měření jednotlivých elementů (válců a kruhů) ve výšce  $182^\circ$ .

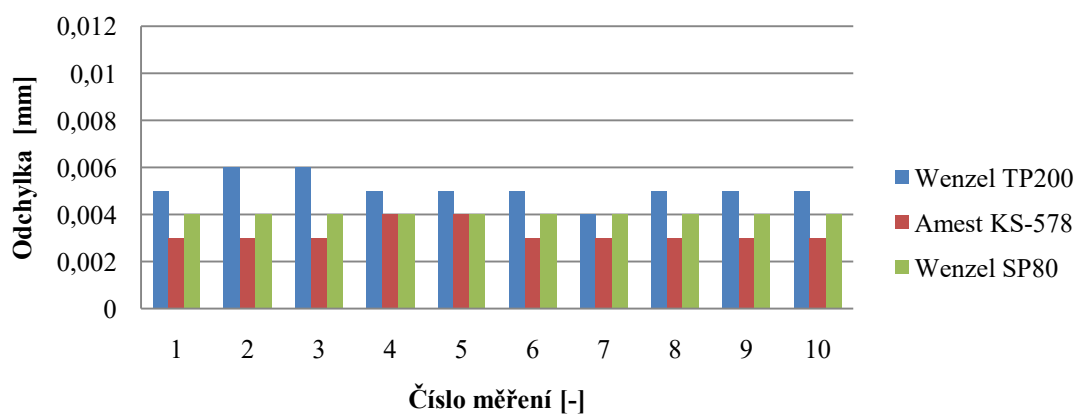
Tab. 7 Válcovitost čep A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578

	Válcovitost - čep A			Válcovitost - čep B		
	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Wenzel TP200	0,0084	0,0020	0,0007	0,0051	0,0020	0,0006
Amest KS-578	0,0030	0,0000	0,0000	0,0032	0,0010	0,0004
Wenzel SP80	0,0030	0,0000	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000

### Válcovitost - čep A



### Válcovitost - čep B



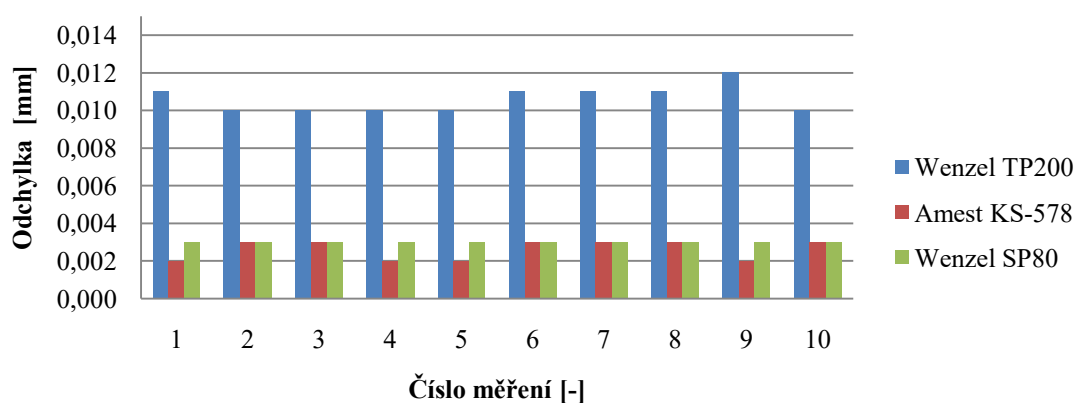
Z tabulek a grafů válcovitostí čepů a prašníků je patrné, že výsledky měření na SMS se senzorikou SP80 vykazují velmi dobré výsledky opakovatelnosti. Velikosti geometrických odchylek téměř odpovídají hodnotám získaným z měřicí stanice Amest KS-578.



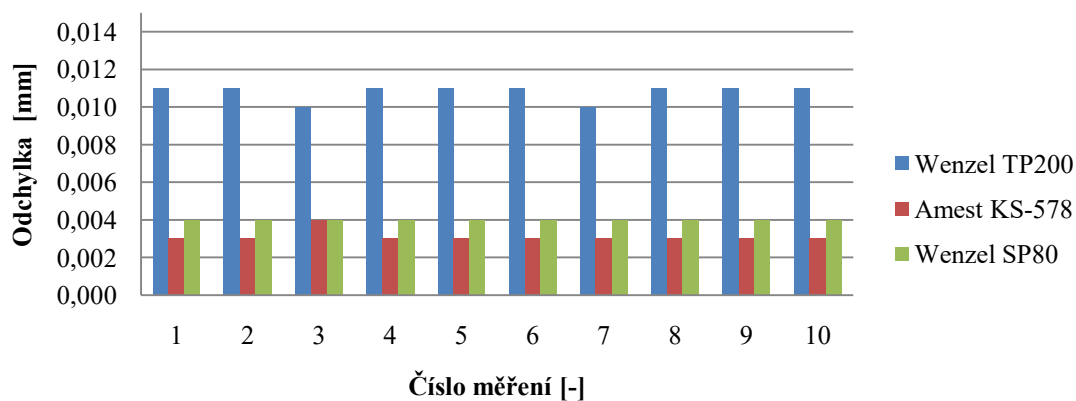
Tab. 8 Válcovitost prašník A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578

	Válcovitost - prašník A			Válcovitost - prašník B		
	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Wenzel TP200	0,0106	0,0020	0,0007	0,0108	0,0010	0,0004
Amest KS-578	0,0026	0,0010	0,0005	0,0031	0,0010	0,0003
Wenzel SP80	0,0030	0,0000	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000

### Válcovitost - prašník A

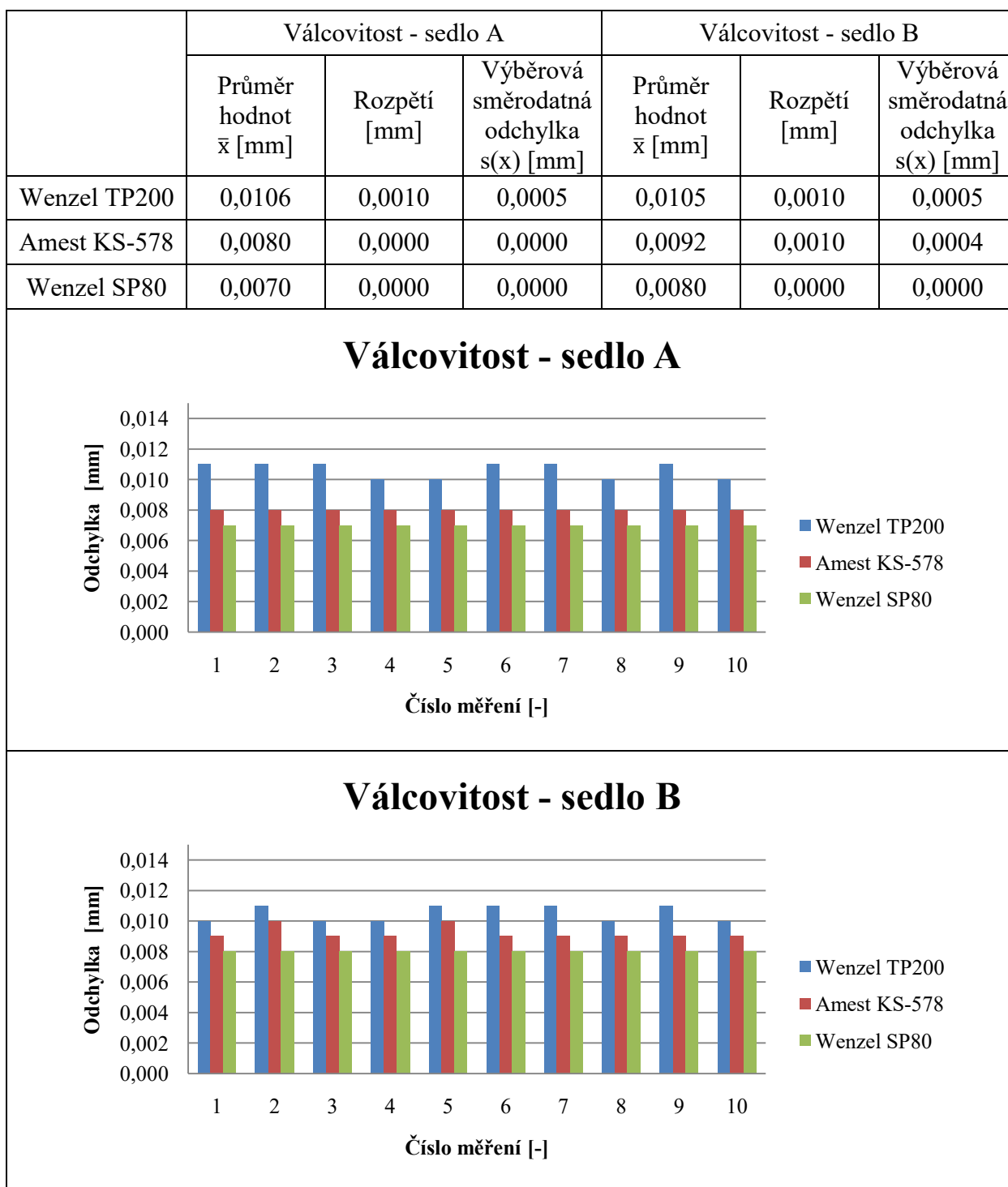


### Válcovitost - prašník B



Válcovitost sedel naměřených dotekovou metodou výseče 182° SMS Wenzel SP80 dosahovala opakovaně hodnot nižších než na měřicí stanici Amest KS-578. Příčinou může být samotná metoda měření (bodově pouze 182° válce). Ale také v rámci nejistot strojů tyto výsledky mohou být blízké pravé hodnotě. Ovšem rozdíl ve válcovitosti činí pouze 0,001 mm. SMS se senzorikou TP200 vykazuje přibližně o 0,002 až 0,003 mm větší odchylky.

**Tab. 9 Válcovitost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578**

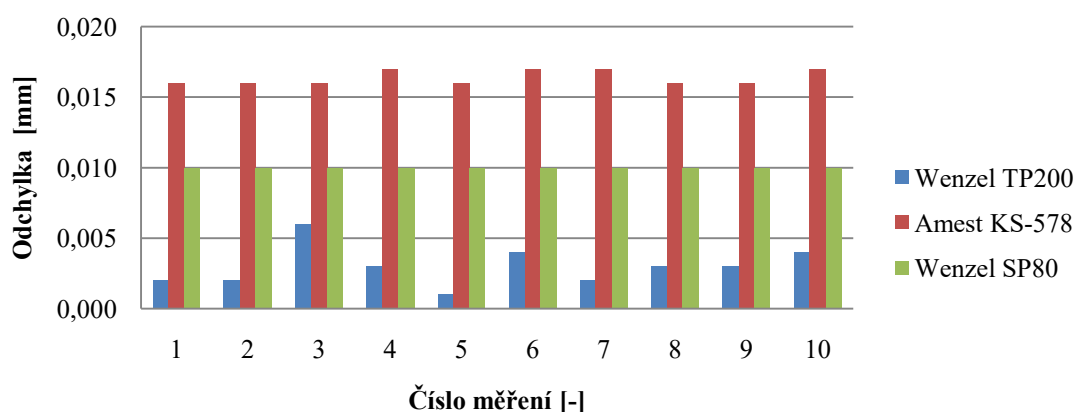


Velikost odchylky házivosti základní hrany A dosahovala na měřicí stanici Amest KS-578 průměrně 0,0164 mm. SMS Wenzel TP200 zaznamenal odchylku z pěti bodů rozsahu 180° pouze 0,003 mm. SMS Wenzel SP80 zaznamenal odchylku ze sedmi bodů rozsahu 180° odchylku 0,010 mm. Tato hodnota se již blíží naměřené odchylce z měřicí stanice, ale výsledky měření dokazují bodovým snímáním nezaznamenání skutečné odchylky.

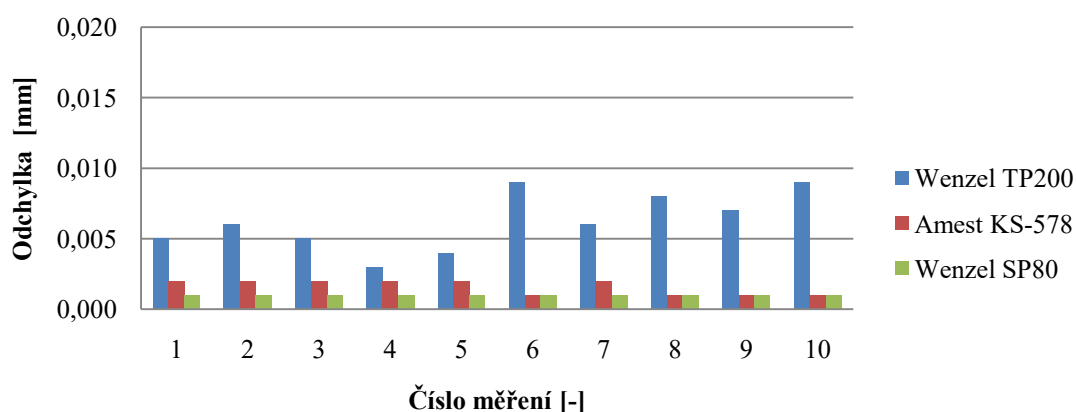
**Tab. 10 Házivost základní hrana A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578**

	Házivost - základní hrana A			Házivost - základní hrana B		
	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Wenzel TP200	0,0030	0,0050	0,0014	0,0062	0,0060	0,0020
Amest KS-578	0,0164	0,0010	0,0005	0,0016	0,0010	0,0005
Wenzel SP80	0,0100	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000

### Házivost - základní hrana A



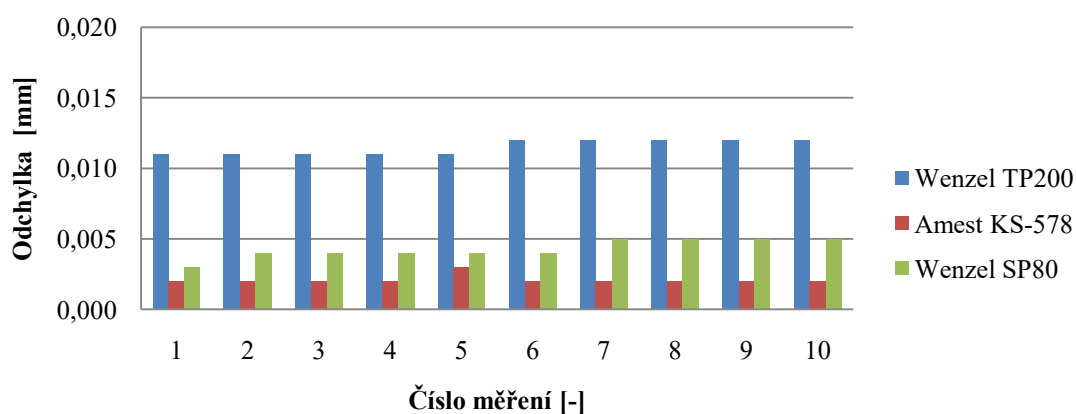
### Házivost - základní hrana B



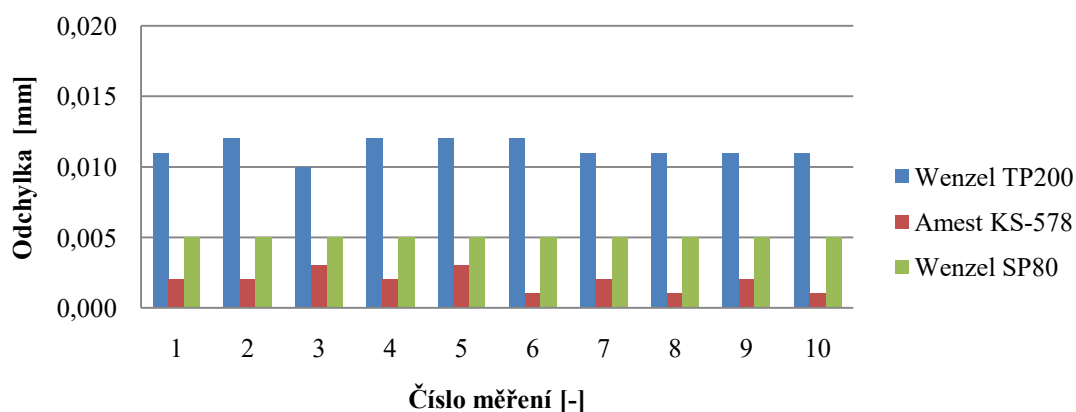
Tab. 11 Házivost prašník A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578

	Házivost - prašník A			Házivost - prašník B		
	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Wenzel TP200	0,0115	0,0010	0,0005	0,0113	0,0020	0,0007
Amest KS-578	0,0021	0,0010	0,0003	0,0019	0,0020	0,0007
Wenzel SP80	0,0043	0,0020	0,0007	0,0050	0,0000	0,0000

### Házivost - prašník A



### Házivost - prašník B

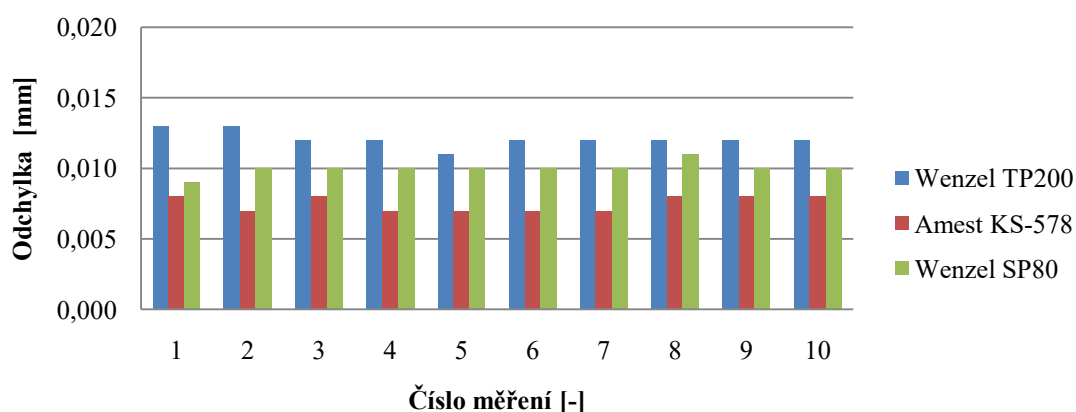


Házivosti prašníků a sedel vykazují u SMS Wenzel SP80 nižší hodnoty než SMS Wenzel TP200, ale zjištěná odchylka z měřicí stanice Amest KS-578 dosahuje předpokládaného nižšího výsledku odchylky.

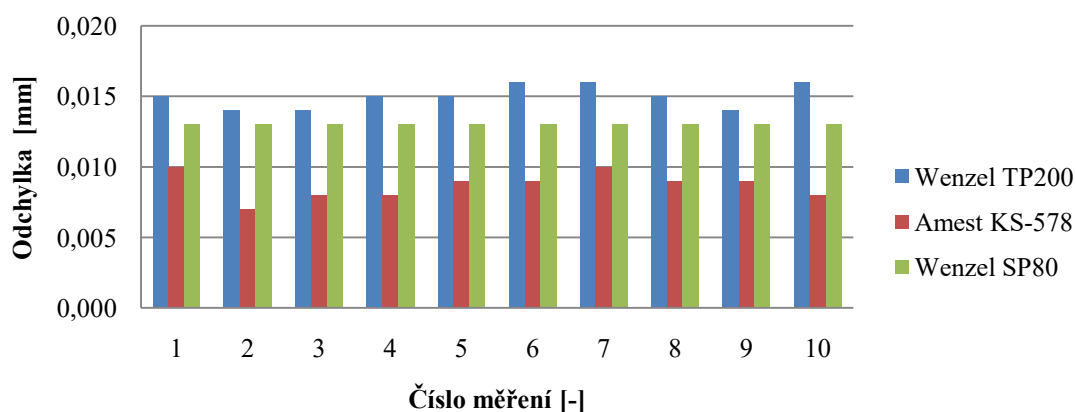
Tab. 12 Házivost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578

	Házivost - sedlo A			Házivost - sedlo B		
	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Wenzel TP200	0,0121	0,0020	0,0006	0,0150	0,0020	0,0008
Amest KS-578	0,0075	0,0010	0,0005	0,0087	0,0030	0,0009
Wenzel SP80	0,0100	0,0020	0,0005	0,0130	0,0000	0,0000

### Házivost - sedlo A

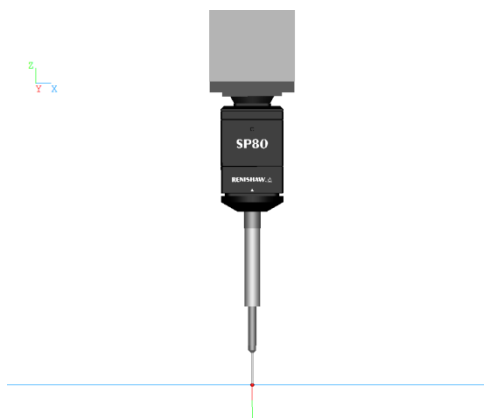


### Házivost - sedlo B



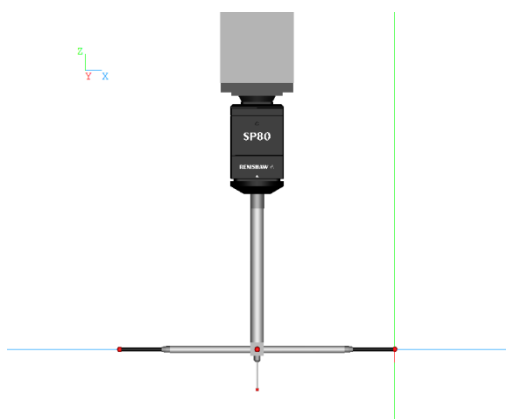
### Porovnání vybraných metod měření geometrií na SMS Wenzel SP80

Měření na SMS Wenzel SP80 bylo provedeno jednoduchým dotekem  $\varnothing 5$  mm délky 50 mm s prodloužením doteku 50 mm + 100 mm (Tab. 7 až 12) (Obr. 54), v bodovém režimu sondy ze směru osy  $z$  (pinoly), úhlovým rozsahem  $182^\circ$  pro kruhy a válce. Pro roviny byl zvolen rozsah úhlu  $180^\circ$ . V (Tab. 13 až 18) uvedeno pod označením **Bodově  $180^\circ$**  případně **Bodově  $182^\circ$** .



Obr. 54 Jednoduchý dotek s prodloužením

Měření na SMS Wenzel SP80 pro snímání 360° kruhových a válcových elementů bylo provedeno vícenásobným dotekem  $\varnothing$  8 mm délky 75 mm s prodloužením (odsazení osy pinoly) délky 120 mm a prodloužením v ose pinoly délky 200 mm (Obr. 55).



Obr. 55 Vícenásobný dotek

Jednotlivé metody měření uvedené v (Tab. 13 až 18) znamenají:

**Bodově 360°** – bodový režim sondy.

**Bodově 360° eliminace 5** – bodový režim sondy s eliminací odlehlých hodnot medián 5.

**Skenem 360°** – ve skenovacím režimu sondy.

**Skenem 360° filtrace 150** – ve skenovacím režimu sondy s filtrací, ořezání čísla vlny 150.

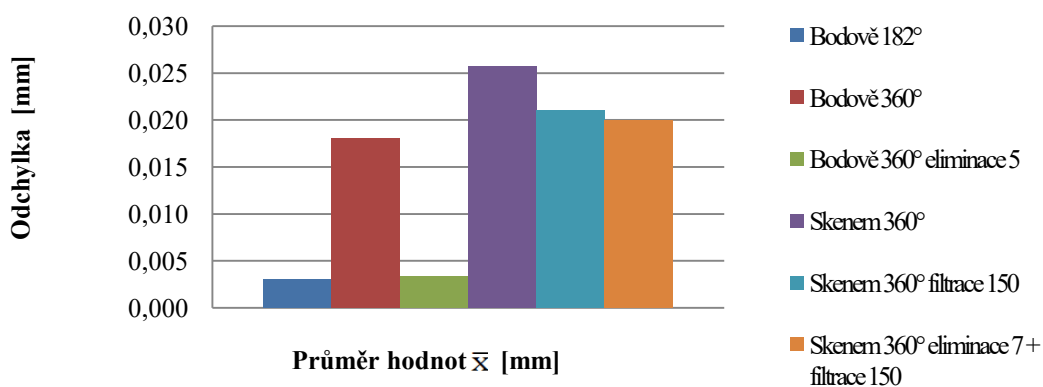
**Skenem 360° eliminace 7 + filtrace 150** – ve skenovacím režimu sondy s eliminací odlehlých hodnot medián 7 a filtrací, ořezání čísla vlny 150.

Vzdálenost bodů u všech skenovacích metod byla zvolena 0,1 mm. Měření probíhalo ve dvou etapách. Snímání dvou výsečí 182° a následné konstrukci elementu 360° (spojení). V (Tab. 13 až 18) byla volena základna pro vyhodnocení z elementu Gaussova nebo nejmenšího opsaného. U metod pro porovnání proběhlo měření každé metody celkem třikrát.

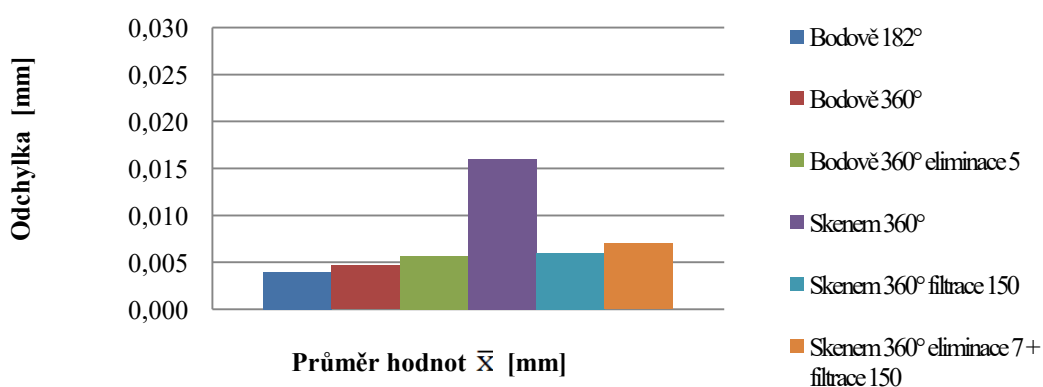
Tab. 13 Válcovitost čep A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem

Metoda výpočtu	Válcovitost - čep A			Válcovitost - čep B		
Gauss	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Bodově 182°	0,0030	0,0000	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000
Bodově 360°	0,0180	0,0000	0,0000	0,0047	0,0010	0,0006
Bodově 360° eliminace 5	0,0033	0,0010	0,0006	0,0057	0,0010	0,0006
Skenem 360°	0,0257	0,0010	0,0006	0,0160	0,0000	0,0000
Skenem 360° filtrace 150	0,0210	0,0000	0,0000	0,0060	0,0000	0,0000
Skenem 360° eliminace 7 + filtrace 150	0,0200	0,0000	0,0000	0,0070	0,0000	0,0000

### Válcovitost - čep A



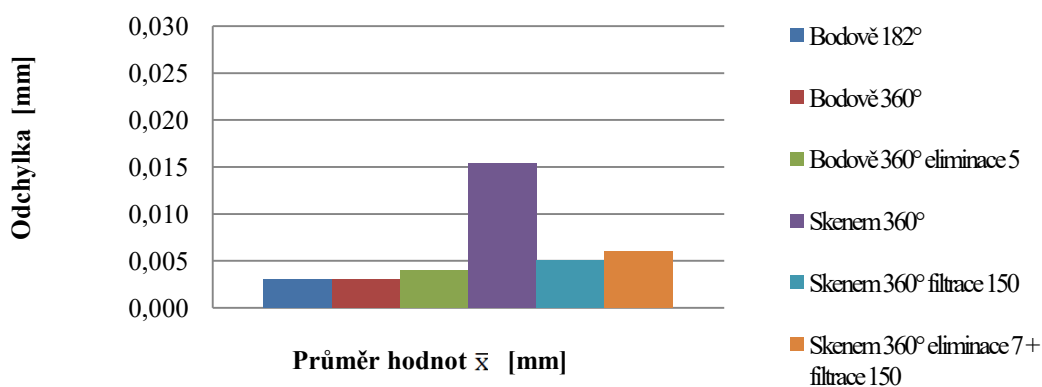
### Válcovitost - čep B



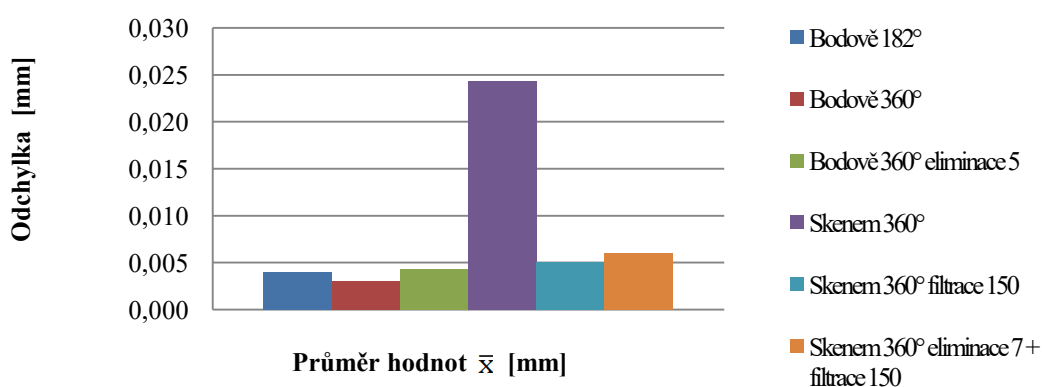
Tab. 14 Válcovitost prašník A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem

Metoda výpočtu	Válcovitost - prašník A			Válcovitost - prašník B		
Gauss	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Bodově 182°	0,0030	0,0000	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000
Bodově 360°	0,0030	0,0000	0,0000	0,0030	0,0000	0,0000
Bodově 360° eliminace 5	0,0040	0,0000	0,0000	0,0043	0,0010	0,0006
Skenem 360°	0,0153	0,0010	0,0006	0,0243	0,0150	0,0081
Skenem 360° filtrace 150	0,0050	0,0000	0,0000	0,0050	0,0000	0,0000
Skenem 360° eliminace 7 + filtrace 150	0,0060	0,0000	0,0000	0,0060	0,0000	0,0000

### Válcovitost - prašník A



### Válcovitost - prašník B

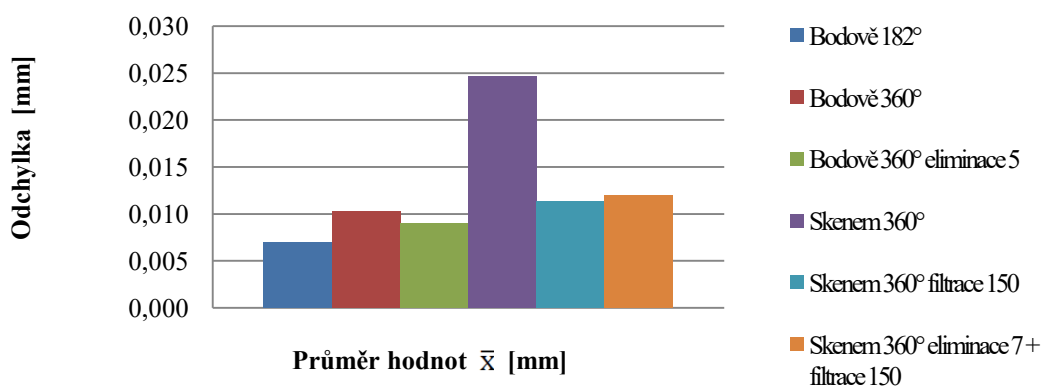




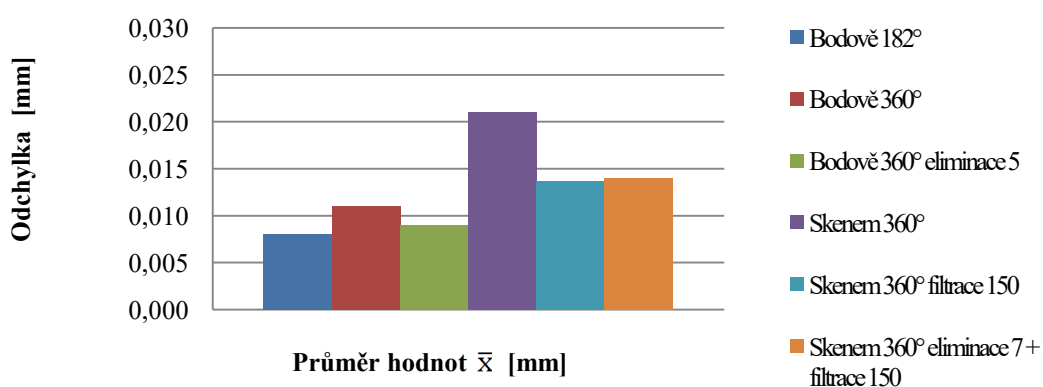
Tab. 15 Válcovitost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem

Metoda výpočtu	Válcovitost - sedlo A			Válcovitost - sedlo B		
Gauss	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Bodově 182°	0,0070	0,0000	0,0000	0,0080	0,0000	0,0000
Bodově 360°	0,0103	0,0010	0,0006	0,0110	0,0000	0,0000
Bodově 360° eliminace 5	0,0090	0,0000	0,0000	0,0090	0,0000	0,0000
Skenem 360°	0,0247	0,0200	0,0115	0,0210	0,0020	0,0010
Skenem 360° filtrace 150	0,0113	0,0030	0,0015	0,0137	0,0010	0,0006
Skenem 360° eliminace 7 + filtrace 150	0,0120	0,0000	0,0000	0,0140	0,0000	0,0000

### Válcovitost - sedlo A

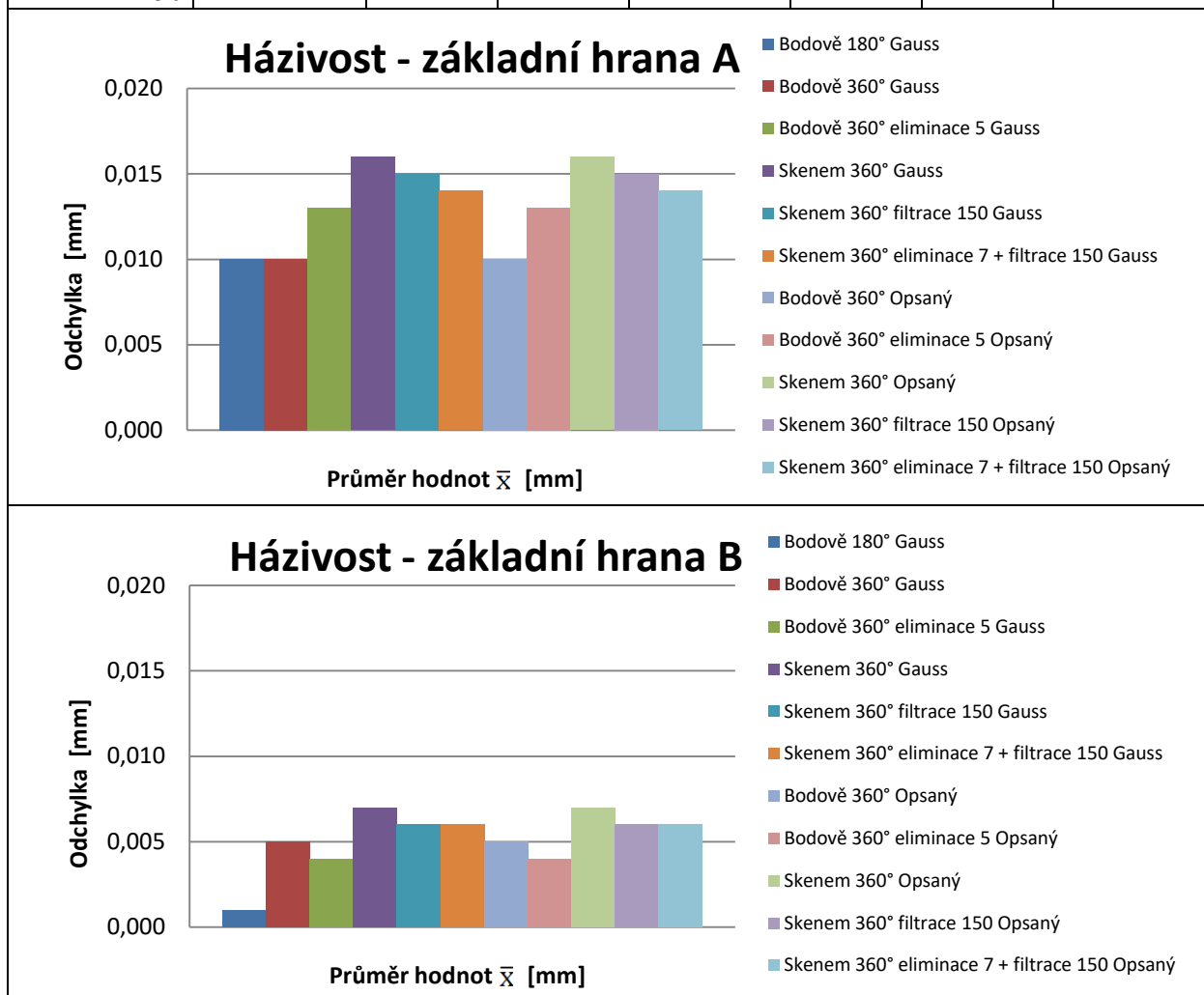


### Válcovitost - sedlo B



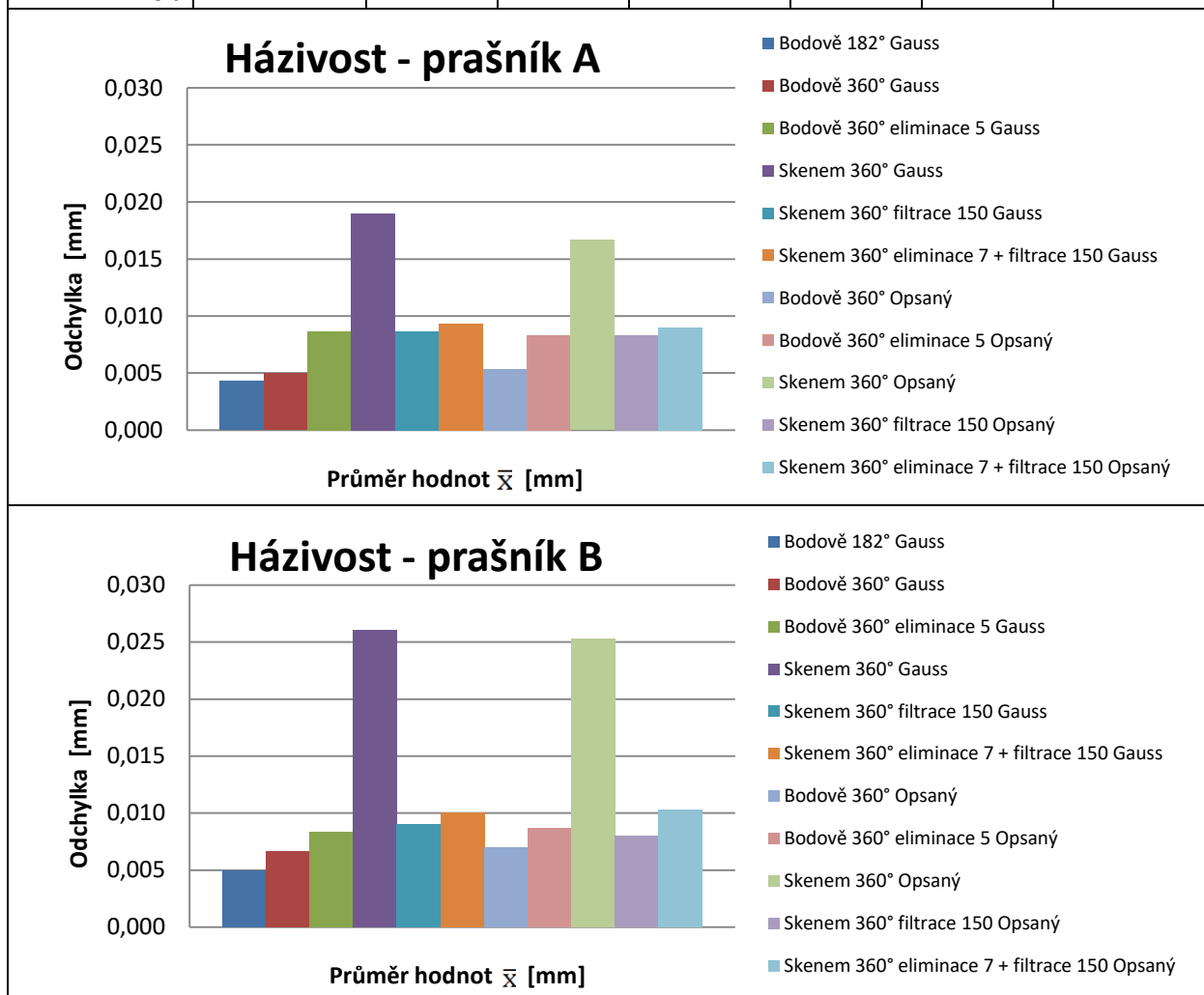
Tab. 16 Házivost základní hrana A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem, opsaný, Gauss

Metoda měření	Metoda výpočtu základny	Házivost - základní hrana A			Házivost - základní hrana B		
		Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Bodově 180°	Gauss	0,0100	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000
Bodově 360°	Gauss	0,0100	0,0000	0,0000	0,0050	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0100	0,0000	0,0000	0,0050	0,0000	0,0000
Bodově 360° eliminace 5	Gauss	0,0130	0,0000	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0130	0,0000	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000
Skenem 360°	Gauss	0,0160	0,0020	0,0010	0,0070	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0160	0,0020	0,0010	0,0070	0,0000	0,0000
Skenem 360° filtrace 150	Gauss	0,0150	0,0000	0,0000	0,0060	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0150	0,0000	0,0000	0,0060	0,0000	0,0000
Skenem 360° eliminace 7 + filtrace 150	Gauss	0,0140	0,0000	0,0000	0,0060	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0140	0,0000	0,0000	0,0060	0,0000	0,0000



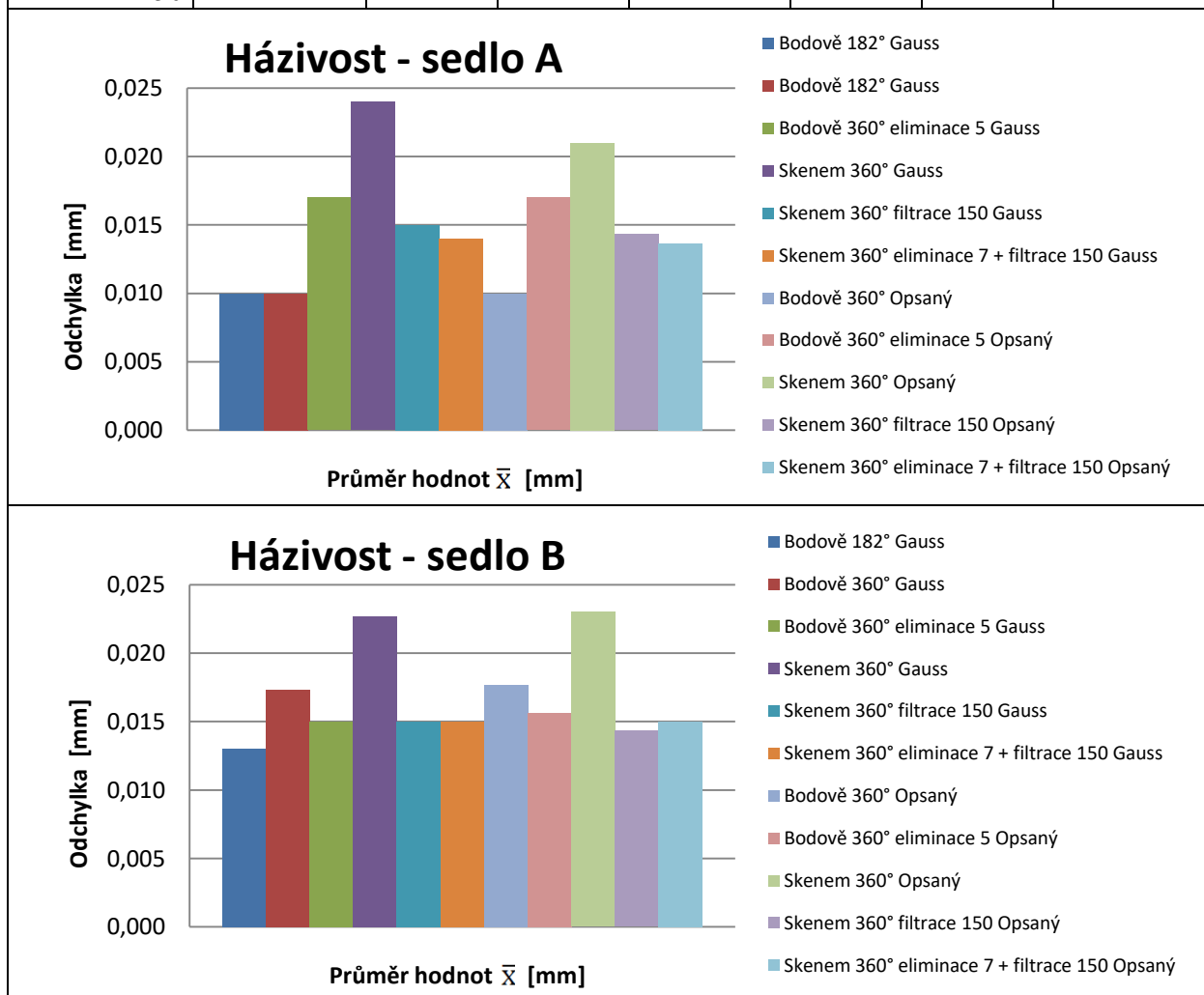
Tab. 17 Házivost prašník A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem, opsaný, Gauss

Metoda měření	Metoda výpočtu základny	Házivost - prašník A			Házivost - prašník B		
		Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Bodově 182°	Gauss	0,0043	0,0020	0,0007	0,0050	0,0000	0,0000
Bodově 360°	Gauss	0,0050	0,0020	0,0010	0,0067	0,0010	0,0006
	Opsaný	0,0053	0,0010	0,0006	0,0070	0,0000	0,0000
Bodově 360° eliminace 5	Gauss	0,0087	0,0010	0,0006	0,0083	0,0010	0,0006
	Opsaný	0,0083	0,0020	0,0012	0,0087	0,0010	0,0006
Skenem 360°	Gauss	0,0190	0,0030	0,0017	0,0260	0,0120	0,0062
	Opsaný	0,0167	0,0010	0,0006	0,0253	0,0140	0,0074
Skenem 360° filtrace 150	Gauss	0,0087	0,0010	0,0006	0,0090	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0083	0,0010	0,0006	0,0080	0,0000	0,0000
Skenem 360° eliminace 7 + filtrace 150	Gauss	0,0093	0,0010	0,0006	0,0100	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0090	0,0020	0,0010	0,0103	0,0010	0,0006



Tab. 18 Házivost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem, opsaný, Gauss

Metoda měření	Metoda výpočtu základny	Házivost - sedlo A			Házivost - sedlo B		
		Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	Rozpětí [mm]	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]
Bodově 182°	Gauss	0,0100	0,0020	0,0005	0,0130	0,0000	0,0000
Bodově 360°	Gauss	0,0113	0,0020	0,0012	0,0173	0,0030	0,0015
	Opsaný	0,0100	0,0030	0,0017	0,0177	0,0020	0,0012
Bodově 360° eliminace 5	Gauss	0,0170	0,0000	0,0000	0,0150	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0170	0,0020	0,0010	0,0157	0,0010	0,0006
Skenem 360°	Gauss	0,0240	0,0030	0,0017	0,0227	0,0040	0,0021
	Opsaný	0,0210	0,0060	0,0035	0,0230	0,0030	0,0017
Skenem 360° filtrace 150	Gauss	0,0150	0,0000	0,0000	0,0150	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0143	0,0010	0,0006	0,0143	0,0010	0,0006
Skenem 360° eliminace 7 + filtrace 150	Gauss	0,0140	0,0000	0,0000	0,0150	0,0000	0,0000
	Opsaný	0,0137	0,0010	0,0006	0,0150	0,0000	0,0000

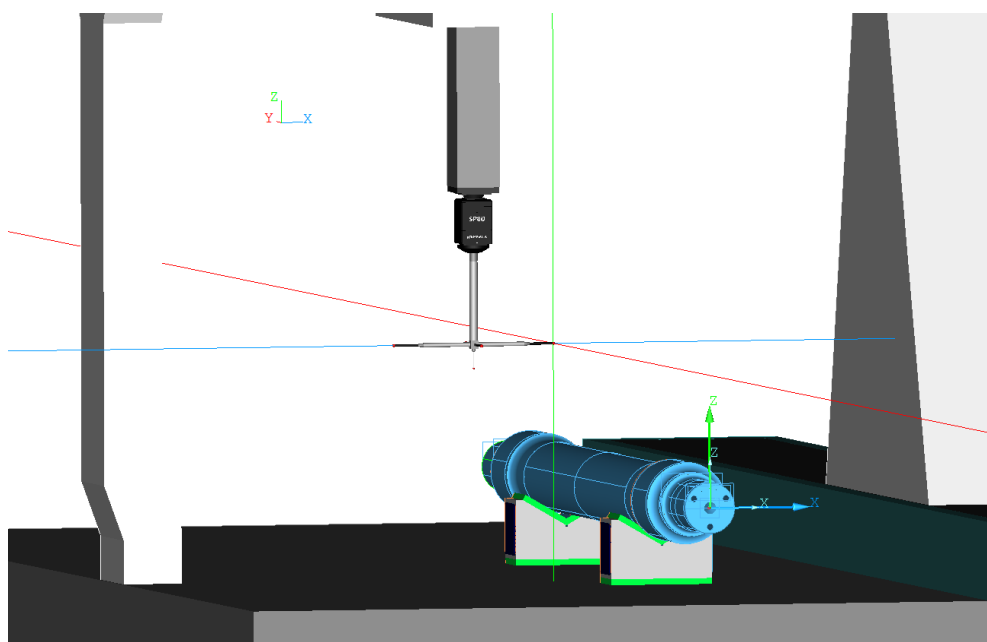


## 6 Zhodnocení výsledků

Porovnání výsledků měření ze SMS Wenzel TP200, SMS Wenzel SP80 a měřicí stanice Amest KS-578 při bodové metodě snímání  $180^\circ$ , případně  $182^\circ$  prokázalo nižší odchylky geometrií na přesnějším stroji s přesnější senzorikou SMS Wenzel SP80. Jako referenční údaje byla použita data z měřicí stanice Amest KS-578. Toto měřicí zařízení provádí skenování celého obvodu měřené součásti za rotace. Proto můžeme takto pořízené data považovat za úplná a blízká pravé hodnotě skutečných odchylek.

Opakovatelnost všech měřicích zařízení dosahovala velmi dobrých výsledků, v mnoha případech nedosahovala ani hodnoty 0,001 mm. Takové výsledky měření v reálném provozu se standardně vyrobeným obrobkem dokazují nejen vyspělou technologii měřicí techniky, ale také její vhodnosti pro tyto měřicí úlohy.

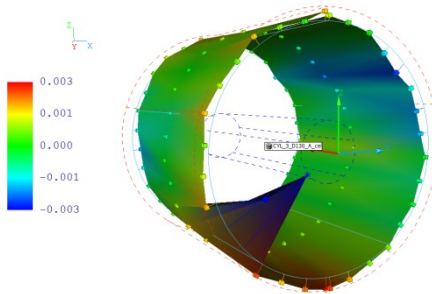
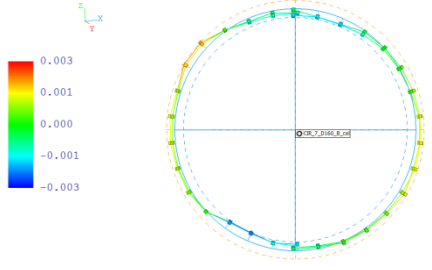
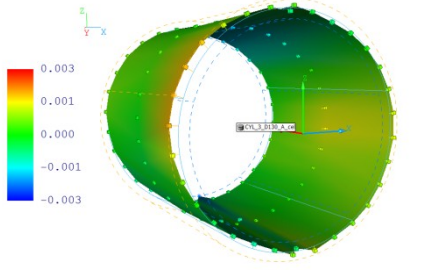
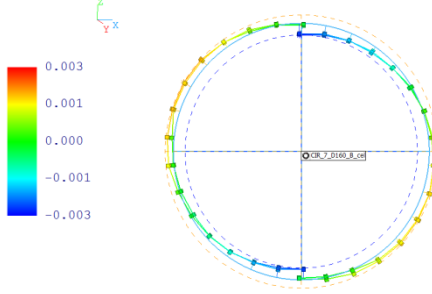
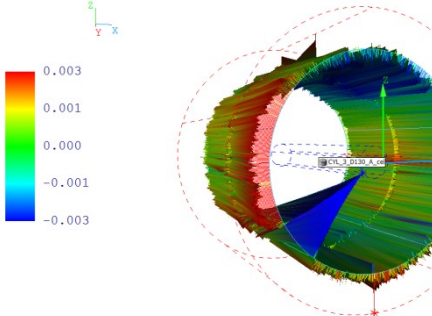
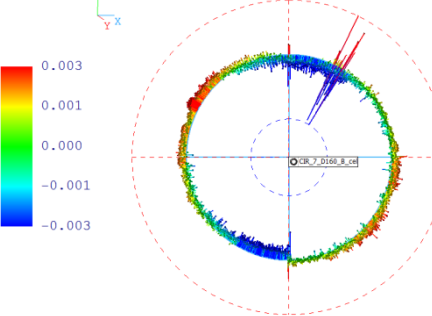
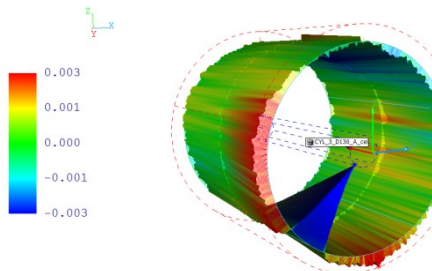
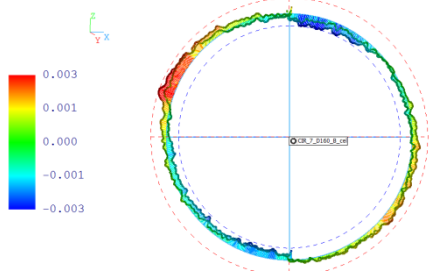
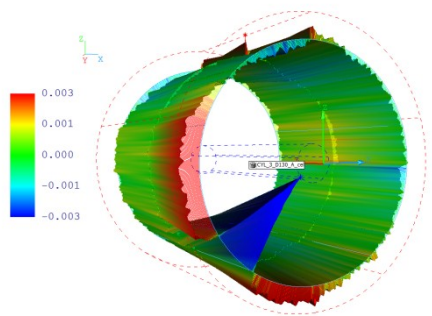
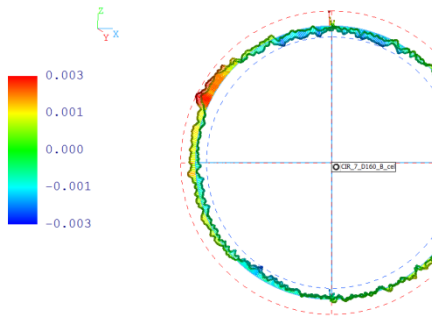
V další části analýzy byla porovnána data pořízená pomocí několika metod měření pouze na SMS Wenzel SP80. Jako základ tvořila data bodové metody s přímým dotekem (Obr. 54) se snímáním válců a kružnic v rozsahu  $182^\circ$ . Roviny byly proměřeny v rozsahu  $180^\circ$ . Všechny ostatní metody snímání byly provedeny vícenásobným dotekem (Obr. 55,56).



Obr. 56 Měření vícenásobným dotekem na SMS Wenzel SP80

Z (Tab. 13 až 18) vyplývá, že bodová metoda  $360^\circ$  dosahuje nejnižších hodnot odchylek. Výsledky bodové metody s eliminací 5 prokázala její nevhodné použití, protože došlo k eliminaci skutečných odchylek a nebo ke zvětšení odchylky (Tab. 19). Tato metoda při nízkém množství bodů není vhodná pro vyhodnocení rozměrů i geometrií.

Tab. 19 Porovnání odchylek jednotlivých metod snímání

Metoda snímání	Nasnímaný element	
	Čep A	Prašník B
Bodová 360° Gauss		
Bodová 360° eliminace 5 Gauss		
Skenovací 360° Gauss		
Skenovací 360° filtrace 150 Gauss		
Skenovací 360° filtrace 150 eliminace 7 Gauss		

Pro porovnání bylo použito elementu čep A a prašníku B. Na čepu A došlo při manipulaci po proměření na SMS Wenzel TP200 a měřicí stanici Amest KS-578 k poškození konce čepu A. Data z těchto zařízení nejsou ovlivněna touto vadou. Také měření na SMS Wenzel SP80 bodovou metodou  $182^\circ$  nebyla touto vadou ovlivněna. Všechny ostatní metody měření na SMS Wenzel SP80 tuto odchylku více či méně odhalily. Pouze eliminace 5 při bodové metodě měření odstranila skutečnou odchylku.

Skenovací metoda bez použití eliminace a filtrace vykazala zachycení do výsledku měření nežádané vlivy kontinuálního snímání. Chvění ovlivnilo výsledek měření natolik, že bez filtrace jsou takto pořízená data nepoužitelná. Pokud by nebyl použit vícenásobný snímač, mohly by být výsledky jiné. Ale v této konkrétní měřicí úloze probíhala analýza této situace.

Filtrace u skenovací metody měření prokázala odstranění nežádoucích vlivů. Pro dobré filtrování je požadováno minimálně 7 bodů na vlnu. Aby podmínka byla splněna, musí být zvoleno dostatečné množství bodů dle (Tab. 4 a 5). V softwaru lze nastavit upozornění na nedostatek bodů na vlnu.

Na velikost odchylek házivosti má také zásadní vliv, jaká metoda výpočtu přiřazeného prvku je použita. V zásadě má základnu tvořit prvek obalový (u hřídele minimální opsaný). Úskalím této metody je vysoká citlivost na odlehlé hodnoty. Jediný odlehlý bod zásadně posune osu přiřazeného prvku. Komplikace nastává s opakovatelností výsledku měření. Soubor hodnot lze testovat na podezření hrubé chyby. Podmínkou je opakované měření. V praxi však nelze z časových a finančních důvodů provádět opakovaná měření. Proto je doporučeno při skenování použít filtraci případně eliminaci. U těchto metod však hrozí nevhodným nastavením nebo jejich kombinací zkreslení naměřených dat. Z těchto důvodů je doporučen grafický výstup posuzovaných geometrií (Tab. 19).

Při použití metody měření u nasnímané výseče  $182^\circ$  obvodu součásti a základnou vytvořenou pomocí obalového prvku, ovlivnění výsledků házivosti je natolik zásadní, že tato data nelze považovat za korektní. V takových případech je vhodnější využít Gaussovo připisování přiřazeného prvku. SMS při vlastní kalibraci využívá Gaussovu vyrovnávací kuličku. Tuto metodu lze využít při dostatečném množství bodů a za podmínky nízkých odchylek tvaru. Výroba posuzovaných částí probíhá na vysoce přesných bruskách nakulato s upnutím mezi hroty. To zaručuje splnění předpokladu vysoké geometrické přesnosti bez deformací součásti od upínacího systému. Tato metoda však neposkytuje úplné výsledky.

Ovlivnění výsledku měření také závisí na použité konfiguraci doteků. V případě vícenásobného doteku je nutno počítat s větší dovolenou chybou SMS než v případě doteku jednoduchého.

## 7 Závěr

Stále vyšší požadavky na přesnost výrobků vyžadují odpovídající přístup k ověření požadovaných nároků. Také nároky na bezpečnost výrobků ovlivňují jejich následný provoz. Výroba kritických a funkčních částí musí být ověřena pomocí vhodných měřicích zařízení. Speciální měřicí zařízení poskytují nejlepší možné výsledky, ale jejich cena a univerzálnost využití má své limity. Velmi často je vyžadováno komplexní proměření součásti pokud možno na jedno ustavení. Tento požadavek splňuje SMS.

V případě měření železniční nápravy je vyžadována vysoká rozměrová a geometrická přesnost. Pro takto rozměrnou součást nejsou běžně k dispozici potřebná měřicí zařízení. Speciální měřicí stanice, například Amest KS-578, poskytuje velmi rychlé výsledky měření a posuzované geometrie vykazují odpovídající výsledky s velmi vysokou přesností a opakovatelností. Svou konstrukcí (upnutí mezi hroty) však neumožňuje některá měření (například souosost podélného vývrtu). Vyhodnocení této geometrické odchylky umožňuje SMS.

Naměřená data, pořízená pomocí různých metod měření, vykazovala různé velikosti odchylek. Neznamená to však, že nejnižší hodnota je ta pravá. Nezachycením případné anomálie některou z metod měření budou sice výsledné hodnoty vyhovující, ale může být ovlivněna funkčnost součásti. Také velmi důsledné skenování s vícenásobným dotekem bez filtrace a eliminace odlehlých hodnot může poskytnout ovlivněné a nereálné výsledky měření. Na základě chybných dat měření i na velmi přesných zařízeních může být výroba považována za neshodnou se všemi důsledky.

Při měření výrobků nelze jednoznačně určit, zda ta či ona metoda měření je nejvhodnější. Předně by se mělo využívat těch zařízení, která byla pro danou úlohu vyvinuta. U reálné úlohy měření na SMS výsledky ovlivňuje množství a rozmístění bodů, metoda pořízení bodů (bodová, skenovací), metoda přiřazení, použití filtrace nebo eliminace a jak výrazná. Použití těchto metod vyžaduje porozumění zákonitostí a souvislostí. V průběhu dlouhé doby měření se mohou změnit podmínky prostředí (teplota, vibrace), což je také nežádoucí. Velmi často při měření je využito nějakého kompromisu. Důležité je také dodržení předpisů, norem a doporučení. Analýza dostupných metod na daném měřicím zařízení umožní využití potenciálu stroje a vyvarování se možných chyb. Výsledky měření prokázaly předpoklady a doporučení při různých metodách.

Posouzení vhodnosti měření geometrických elementů na automatické měřicí stanici Amest KS-578, SMS Wenzel se senzorikou TP200 a SMS Wenzel se senzorikou SP80 prokázalo možnost použití těchto zařízení. Metody vyhodnocení je však nutno vybírat s velkou obezřetností, aby nedošlo k šíření chybně vyhodnocených odchylek.



## **Poděkování**

Děkuji Ing. Lence Čepové, Ph.D. z katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB-TU Ostrava za vedení a inspiraci k řešení diplomové práce, firmě BONATRANS GROUP a.s. za umožnění vypracování diplomové práce a kolegům, především p. Ing. Lukáši Zlému, technologovi za rady a konzultaci a p. Tomášovi Kulfirstovi, programátorovi automatické měřicí stanice Amest.

## Seznam použité literatury

- [1] GHH-BONATRANS [online]. 2017 [cit. 2017-01-17]. Dostupný z WWW: <http://www.ghh-bonatrans.com/>.
- [2] BONATRANS GROUP a.s. *Interní dokumenty BTG*.
- [3] ČSN ISO 4291. *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti. Měření změn poloměru*. Brno: Duben 1994. 28 s.
- [4] ČSN EN ISO 1101. *Geometrická specifikace výrobků – Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Leden 2014. 120 s.
- [5] DRASTÍK, F. *Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. Tolerování rozměrů a geometrických vlastností*. Montanex 1996. 271 s.
- [6] Humienny, Zbigniew. *Geometrical Product Specifications: Course for Technical Universities*. Warsaw University of Technology Printing House: 200. ISBN 8391219089, 9788391219089. 350 s.
- [7] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4. 125 s.
- [8] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1. 143 s.
- [9] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, 2004, 110 s.
- [10] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Strojírenská metrologie: Studijní opora "Strojírenská metrologie"*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2723-0. 99 s.
- [11] Nejistoty měření [online]. 2017 [cit. 2017-03-23]. Dostupný z WWW: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>.

- [12] ČSN EN ISO 10360-2 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Praha: Srpen 2010. 32 s.
- [13] ČSN EN ISO 10360-1 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník*. Praha: Září 2001. 44 s.
- [14] ČSN EN ISO 10360-5 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 5: Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotekem*. Praha: Květen 2011. 32 s.
- [15] ČSN EN ISO 10360-4 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 4: Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenováním*. Praha: Září 2001. 16 s.
- [16] Metrosoft QUARTIS<sup>®</sup> R12 - Uživatelská příručka. 2015 Wenzel Mertomec AG, Chur.
- [17] ČSN EN ISO 4287 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Březen 1999. 24 s.
- [18] Renishaw.cz [online]. 2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.renishaw.cz/cs/machine-tool-probes-for-component-setting-and-inspection--6075>.
- [19] Kubousek.cz [online]. 2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.kubousek.cz/cz/divize-pristroje/vici-vision/opticky-merici-pristroj-mtl-1250-ergon.html>.
- [20] Mahr.com [online]. 2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupný z WWW: <https://www.mahr.com/cs/Produkty-a-sluzby/Vyrobní-měřicí-technika/Produkty/MarShaft---Optická-a-dotyková-zařízení-na-měření-hřidelí/MarShaft-SCOPE-600-plus-3D/>.
- [21] Wenzel-group.com [online]. 2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupný z WWW: [http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/cmm/lh-1210-3d-coordinate-measuring-machine.php?we\\_ID=2865#](http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/cmm/lh-1210-3d-coordinate-measuring-machine.php?we_ID=2865#).
- [22] DRBŮL, M., ŠAJGALÍK, M., ŠEMCER, J., CZÁNOVÁ, T., PETŘKOVSKÁ, L., ČEPOVÁ, L. *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami*

*obrábania*. Žilina: ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnéj techniky. 2014. 115 s.

- [23] Renishaw.cz [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupný z WWW: <http://renishaw.cz/cs/tp200--6671>.
- [24] Zeiss.cz [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupný z WWW: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/vast-gold.html>.
- [25] Renishaw.cz [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupný z WWW: <http://renishaw.cz/cs/sp80-a-sp80h--6686>.
- [26] Zeiss.cz [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupný z WWW: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/dotscan.html>.
- [27] Wenzel-group.com [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupný z WWW: [http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/sensors/optical-sensors-3d-line-scanner-shapetracer.php?we\\_ID=1664#](http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/sensors/optical-sensors-3d-line-scanner-shapetracer.php?we_ID=1664#).
- [28] Zeiss.cz [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupný z WWW: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/zeiss-rotos.html>
- [29] Wenzel-group.com [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupný z WWW: [http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/geartec/bridge-type-measuring-machine-lh-gear.php?we\\_ID=2564#](http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/geartec/bridge-type-measuring-machine-lh-gear.php?we_ID=2564#).
- [30] AMEST s.r.o. [online]. 2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupný z WWW: <http://www.amest.cz/zeleznicni-prumysl>.
- [31] Carl Zeiss. s.r.o. Průmyslová měřicí technika. *Portálové měřicí stroje*. CZ\_60\_020\_158I. Germany.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Výrobní závody a země dodávek [1].....	12
Obr. 2 Dvojkolí pro vozy metra [1].....	13
Obr. 3 Pevnostní výpočet celistvého kola [1].....	14
Obr. 4 Listové tlumiče [1] .....	15
Obr. 5 Popis jednotlivých částí nápravy.....	16
Obr. 6 Vliv poloměru hrotu měřicího doteku při kontaktu s povrchem [3] .....	17
Obr. 7 Orientace přímek přímosti [4] .....	19
Obr. 8 Konvexní profil [5].....	19
Obr. 9 Konkávní profil [5].....	19
Obr. 10 Umístění středů dvou soustředných kružnic [4].....	20
Obr. 11 Ovalita [5] .....	20
Obr. 12 Hranolovitost [5] .....	20
Obr. 13 Válcovitost [4].....	21
Obr. 14 Kuželovitost [5].....	21
Obr. 15 Soudkovitost [5] .....	22
Obr. 16 Rovnoběžnost osy se základní osou [5] .....	22
Obr. 17 Rovnoběžnost dvou rovin [5] .....	22
Obr. 18 Kolmost roviny k přímce [5].....	23
Obr. 19 Soustřednost .....	24
Obr. 20 Celkové obvodové házení [5].....	25
Obr. 21 Kruhové čelní házení [5] .....	25
Obr. 22 Předpis a výklad nezávislosti tolerance přímosti a kruhovitosti [5].....	26
Obr. 23 Předpis požadavku kontroly válcového hřídele obalovou plochou [5] .....	27
Obr. 24 Označení základen [6] .....	27
Obr. 25 Základna ze dvou základních prvků [4] .....	28
Obr. 26 Parametry normálního rozdělení [9].....	31
Obr. 27 Body dotyku [14].....	36
Obr. 28 Čtyři cílové skenovací roviny na zkušební kouli [15].....	37
Obr. 29 Metoda připisování podle Gausse [16] .....	38
Obr. 30 Metoda připisování podle Tšebyševa [16].....	38
Obr. 31 Metoda připisování nejmenší opsané kružnice [16] .....	39
Obr. 32 Metoda připisování největší vepsané kružnice [16] .....	39

Obr. 33 Metoda připasování v tangentě [16] .....	40
Obr. 34 Metoda připasování mimo tangentu [16] .....	40
Obr. 35 Způsob eliminace odlehlých hodnot [16] .....	41
Obr. 36 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [17] .....	42
Obr. 37 Počet průchodů nulou skutečného kruhového profilu [5] .....	43
Obr. 38 Obrobková sonda OSP60 [18] .....	45
Obr. 39 Umístění optického měřicího přístroje do provozu [19] .....	45
Obr. 40 MarShaft rozsahu 600 plus 3D [20] .....	46
Obr. 41 SMS Wenzel LH 1210 [21] .....	47
Obr. 42 Tenzometrická sonda TP200 [23] .....	48
Obr. 43 Senzor pro aktivní skenování VAST gold [24] .....	48
Obr. 44 Skenovací sonda SP80 [25] .....	49
Obr. 45 Otočný senzor s bílým světlem ZEISS DotScan [26] .....	49
Obr. 46 3D Line skener Shapetracer [27] .....	49
Obr. 47 Snímač drsnosti povrchu Zeiss rotos [28] .....	50
Obr. 48 Hybridní 3D stroj typu LH [29] .....	50
Obr. 49 Měření nápravy na SMS Wenzel LH 1512 se senzorikou TP200 .....	52
Obr. 50 Měření nápravy na SMS Wenzel LH 1512 se senzorikou SP80 .....	53
Obr. 51 Automatická měřicí stanice Amest KS-578 .....	54
Obr. 52 Příklad měřených parametrů [30] .....	54
Obr. 53 Vliv metody výpočtu přiřazeného prvku [31] .....	55
Obr. 54 Jednoduchý dotek s prodloužením .....	62
Obr. 55 Vícenásobný dotek .....	62
Obr. 56 Měření vícenásobným dotekem na SMS Wenzel SP80 .....	69

## Seznam tabulek

Tab. 1 Geometrické tolerance [4] .....	18
Tab. 2 Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost 95 % [8] .....	32
Tab. 3 Hodnoty $k_{uA}$ pro pravděpodobnost 95 % [9] .....	33
Tab. 4 Doporučený práh vlnové délky [16] .....	43
Tab. 5 Doporučený počet vln na obvod [16] .....	44
Tab. 6 Přímka s 2000 body a délkou 60 mm (s provedenou eliminací odlehlých hodnot) [16] ...	44
Tab. 7 Válcovitost čep A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578 .....	56
Tab. 8 Válcovitost prašník A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578 .....	57
Tab. 9 Válcovitost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578 .....	58
Tab. 10 Házivost základní hrana A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578 .....	59
Tab. 11 Házivost prašník A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578 .....	60
Tab. 12 Házivost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, Amest KS-578 .....	61
Tab. 13 Válcovitost čep A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem .....	63
Tab. 14 Válcovitost prašník A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem .....	64
Tab. 15 Válcovitost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem .....	65
Tab. 16 Házivost základní hrana A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem, opsaný, Gauss .....	66
Tab. 17 Házivost prašník A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem, opsaný, Gauss .....	67
Tab. 18 Házivost sedlo A, B, SMS TP200, SP80, bodově, skenem, opsaný, Gauss .....	68
Tab. 19 Porovnání odchylek jednotlivých metod snímání .....	70

## Seznam příloh

Příloha A – měřicí protokoly, použita sensorika TP200, název: Měřicí protokol Wenzel LH 1512, 10 kusů; nezveřejněné.

Příloha B – měřicí protokoly, název: Amest e.č. 14 – 4/11, 10 kusů; nezveřejněné...

Příloha C – výkres součásti, název: Náprava\_SB3 000.01; nezveřejněné.

Příloha D – měřicí protokoly, použita sensorika SP80, název: Měřicí protokol Wenzel LH 1512, 40 kusů; nezveřejněné.